

УДК 621.74.002:669.131.7

DOI: 10.12737/18185

К.В. Макаренко, Д.А. Илюшкин

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУР ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

Представлены результаты использования метода идентификации формы графитовых включений и определения их размерно-топологических параметров. Форма графитовых включений определена через фрактальную размерность исследуемого включения, а распределение – через лакунарность. При применении метода для анализа изоб-

ражений различных по структуре и способу получения чугунов установлена хорошая адекватность результатов и наблюдаемых микроструктур.

Ключевые слова: микроструктура, фрактальный анализ, чугун, графитовые включения, размерно-топологические параметры.

K.V. Makarenko, D.A. Ilyushkin

FRactal Analysis of Microstructures in Graphitized Cast Iron

The dimensional-topological parameters of a structure such as size, shape, quantity and distribution characterizing a graphite phase in cast iron exert a significant influence upon material properties. But, the definition of these parameters according to the system presented in SARS 3443-87, to the considerable extent, depends upon human factor. The use of results of such an analysis does not allow creating adequate simulators for the estimation of correlation of structure and properties.

The widespread introduction of computer analysis methods for the control of material structures dic-

tates new requirements to the development of methods using a mathematical description of material phase structure. One of the methods based on a multi-fractal analysis of cast iron micro-structure representation is shown in this paper.

Data obtained at the use of carbon fleck fractal identification method can be used at the development of simulators of the correlation in structure graphitized cast iron properties.

Key words: microstructure, fractal analysis, cast iron, carbon flecks, dimensionally-topological parameters.

Введение

При классификации графитовых включений в соответствии с ГОСТ 3443 – 87 исходят из сравнительной оценки реальных микроструктур с эталонными изображениями. Такой метод требует от исследователя определенных навыков и затрудняет классификацию графитовых включений при образовании смешанных или переходных структур.

Существует два основных подхода к описанию размерно-топологических параметров структуры: через безразмерные факторы формы или измерение контура включений. Наиболее простой из них, предложенный С.А. Салтыковым [13] и использующий безразмерный фактор формы:

$$\Phi = 3,545 \frac{\sqrt{F}}{P},$$

где F – площадь включения; P – периметр включения.

Для включений идеальной сферической формы $\Phi = 1$.

О.В. Соценко [13] предложил использовать, помимо безразмерного фактора формы, измерение контура для определения компактности включений:

$$\Phi_{\kappa} = \frac{F}{F_0},$$

где F_0 – площадь круга, описанного вокруг включения.

На базе этого метода им были разработаны эталонные шкалы, содержащие разнообразные модификации форм графитовых включений, присутствующих в чугунах.

Аналогичную эталонную шкалу для идентификации формы графитовых включений после модифицирования и

оценки их влияния на физико-механические свойства чугунов разработал В.И. Литовка [10]. Для определения степени сфероидизации графита (ССГ) им была использована формула

$$ССГ = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Phi_i N_i}{\sum_{i=1}^{i=n} N_i} 100\%,$$

где Φ_i – величина фактора формы графитовых включений; N_i – количество включений графита, входящих в i -ю группу и имеющих фактор формы Φ_i .

Для тех случаев, когда в плоскости шлифа наблюдается одновременно несколько различных форм графитовых включений, С.А. Салтыков предложил использовать обобщенный фактор формы, учитывающий долю каждой из форм графита [14]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{i=n} \Phi_i q_i,$$

где Φ – фактор формы включений графита (для графита шаровидной формы $\Phi = 1$, вермикулярной – $\Phi = 0,2 \dots 0,5$, в зависимости от расположения его колоний и их размеров); q_i – объемная доля графита каждой из форм в структуре чугуна.

Такое решение представляет собой упрощенный вариант метода, предложенного В.И. Литовкой.

И.П. Волчок [7] применил индекс графита, который позволяет определить одновременно количество и форму графита. Индекс графита рассчитывается как отношение суммы максимальных размеров a_i i -х включений графита к длине L произвольной секущей, их пересекающей:

$$J_r = \frac{\sum a_i}{L}.$$

В современных условиях, когда все большее распространение получают различные аналитические компьютеризированные комплексы, предназначенные для металлографических исследований, задача идентификации включений на изображениях микроструктуры решается с помо-

щью специализированного программного обеспечения.

При разработке программного обеспечения используют различные подходы и алгоритмы расчета, при этом количество изучаемых параметров, относящихся к описанию включений, возрастает в несколько раз. Так, программа Macros III (Carl Zeiss, Vienna, Austria) для оценки сферичности графитовых включений в чугуне с шаровидным графитом использует более 10 различных параметров [2].

Бразильские исследователи, занимающиеся вопросами идентификации графитовых включений в чугуне, приводят 5 модификаций расчета одного фактора, применяемого для оценки степени сферичности включений [5].

Между тем существует другой подход к решению проблемы идентификации графитовых включений в чугуне. Подход базируется на исследованиях, доказывающих, что рост графитовых включений в чугуне подчиняется законам фрактальной геометрии [3; 4; 12].

Фрактальная геометрия [1; 11] позволяет описать сложные по строению геометрические объекты через один параметр, которым является фрактальная размерность (D). Для идеальной сферы в 3-мерном пространстве $D = 3$, для круга в плоскости $D = 2$, для окружности и прямой линии $D = 1$. Для простейших геометрических фигур фрактальная размерность совпадает по значению с евклидовой и топологической размерностями. Для сложных по форме внешней поверхности объектов характерны дробные размерности, которые для включений, изучаемых в плоскости шлифа, будут находиться в интервале $1 \dots 2$. Для описания сложных объектов, к которым, в частности, относятся графитовые включения, необходимо использовать мультифрактальные методы описания их геометрических параметров [8; 6].

Методика исследования

Изучение и регистрацию микроструктуры проводили на аналитическом компьютеризированном комплексе, созданном на базе инвертированного металлографического микроскопа Leica DM IRM.

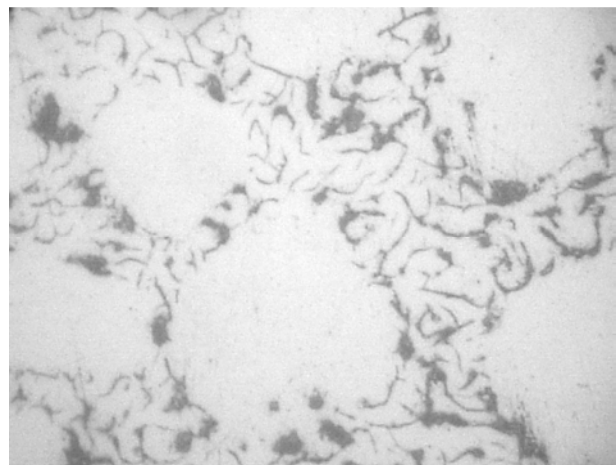
Фрактальный анализ полученного изображения выполняли с использованием программы ImageJ и модуля FracLac 2.5, который работает с бинарными (черно-белыми) изображениями и позволяет рассчитывать фрактальные размерности несколькими способами. Для анализа распределения эвтектических ячеек в структуре высокопрочного чугуна был использован алгоритм определения фрактальных размерностей по методу сеток [9], при котором изображение агрегата разбивается сеткой на ячейки заданных размеров. Сканирование изображения агрегата осуществляется за несколько циклов, при этом

Исследование структуры чугуна с междендритным графитом

В соответствии с методикой исследуемая структура представляется как бинарный массив, разбиваемый на ячейки заданного размера. Для каждой ячейки проводится оценка единичных элементов структуры, которая имеет корреляционную взаимосвязь с массивом всей структуры.



а)



б)

Рис. 1. Исходная микроструктура чугуна: а – дендриты аустенита (не травлено), $\times 80$; б – междендритный графит (не травлено), $\times 1000$

Мультифрактальную параметризацию для оценки геометрических параметров дендритной структуры первичного

на каждом последующем цикле размеры ячеек сетки увеличиваются. Фрактальная размерность анализируемого бинарного изображения агрегата вычисляется по формуле

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N_{\varepsilon}}{\ln \varepsilon}, \quad (1)$$

где ε – размер ячейки сетки; N_{ε} – число ячеек размера ε , содержащих пиксели изображения агрегата. Размер ячейки (ε) определяется как отношение площади ячейки к общей площади изображения.

Геометрически вероятностная фрактальная размерность D_{β} в программном модуле FracLac 2.5 определяется по наклону регрессионной линии, рассчитанной по методу наименьших квадратов в координатах $(-\ln \varepsilon) - \ln N_{\varepsilon}$.

Исследовали микроструктуру доэвтектического чугуна. Микроструктура чугуна представлена дендритной матрицей (рис. 1а) с междендритным мелкодисперсным эвтектическим графитом (рис. 1б).

аустенита и эвтектического графита производили на бинарных изображениях (рис. 2).

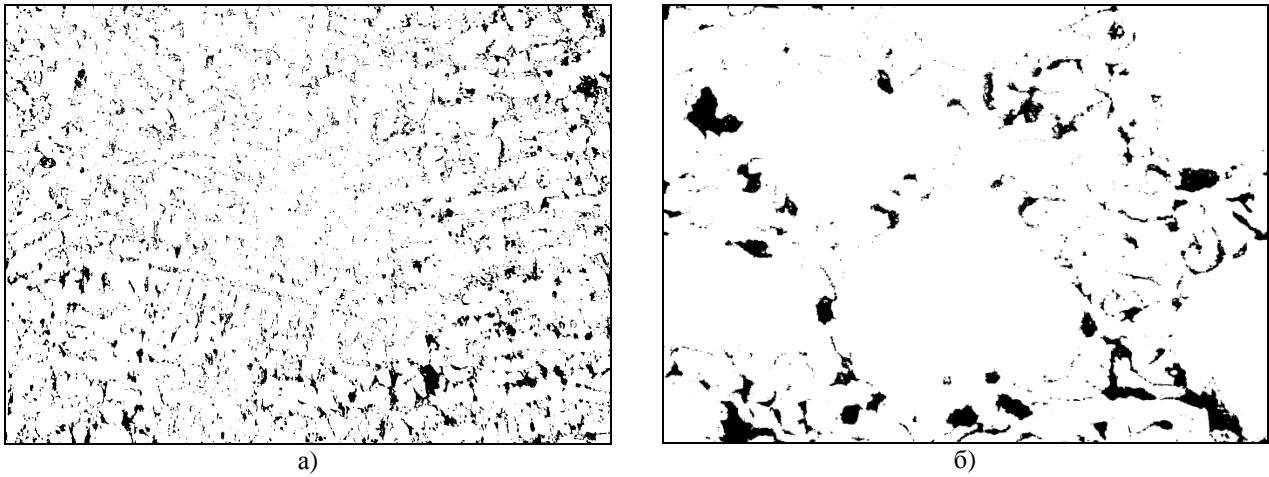


Рис. 2. Бинарные изображения микроструктуры, представленной на рис. 1: а – дендриты аустенита; б – междендритный графит

Описательной характеристикой в мультифрактальном формализме является спектр обобщенных размерностей D_q . В спектре выделяют хаусдорфову (D_0), информационную (D_1) и корреляционную (D_2) размерности. Для более точной оценки анализируемых геометрических объектов используют функцию мультифрактального спектра $f(\alpha)$.

Для проведения мультифрактального анализа изображения микроструктуры чугуна использовали программный модуль FracLac 2.5, который является плагином программы ImageJ. Анализировали $f(\alpha)$ -спектры и спектры D_q обобщенных размерностей Реньи. Результаты анализа представлены на рис. 3.

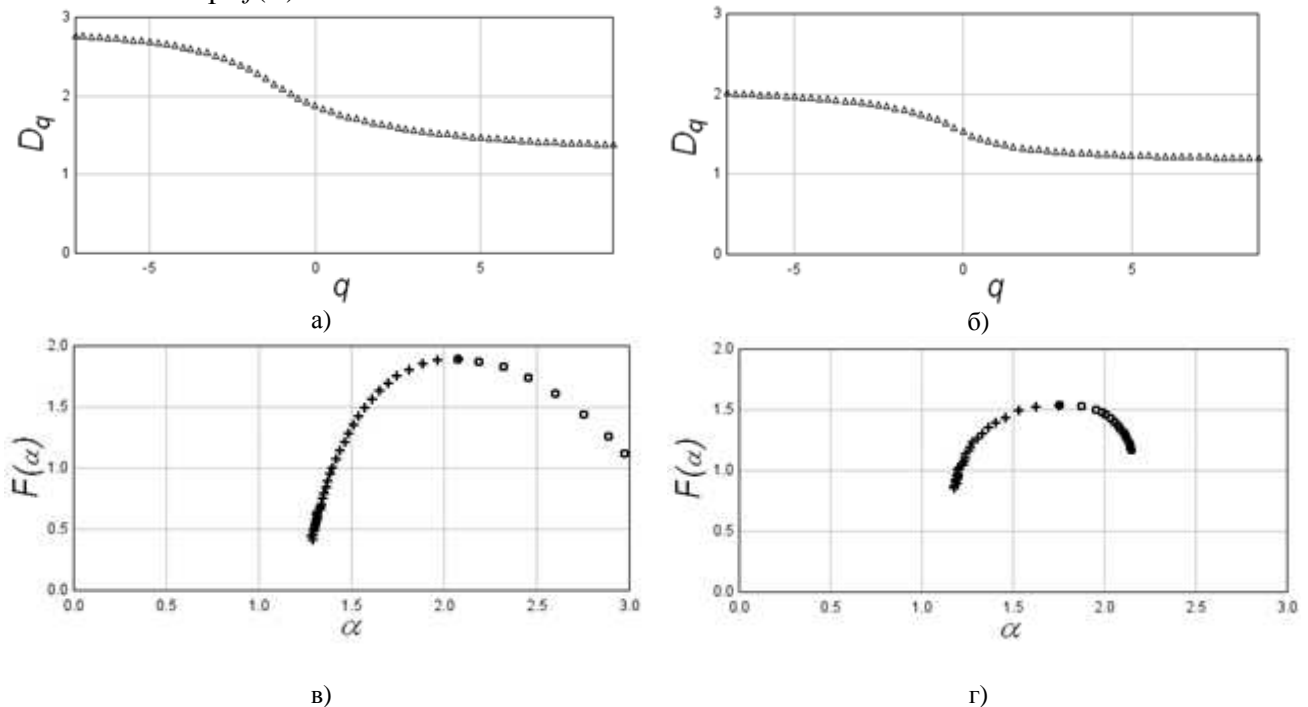


Рис. 3. Спектры обобщенных размерностей (а – для дендритов аустенита; б – для эвтектического графита) и $f(\alpha)$ -спектры (в – для дендритов аустенита; г – для эвтектического графита)

Представленные графики характеризуют обе микроструктуры как мультифрактальные, $D_q > D_{q'}$ при $q' > q$. Анализ хаусдорфовой размерности ($D_{0\text{дендр. ауст}} =$

$1,8946 > D_{0\text{эвтек. граф}} = 1,5452$) показывает, что дендритная структура аустенита, имеющая преобладающую фрактальную размерность, является ведущей при струк-

турообразовании чугуна. Это объясняется тем, что геометрические объекты, обладающие большей фрактальной размерностью, возникают первыми в фазовом пространстве, стремясь обеспечить себе наиболее развитое строение, не ограниченное конкурентными фазами. Графитовая фаза выделяется в междендритных

Определение размерно-топологических параметров графитовой фазы в чугунах

В качестве исходных изображений для анализа использовали стандартные шкалы ГОСТ 3443-87 и нетравленные шлифы различных по структуре и технологии получения чугунов.

Первично в ходе операции сегментации на бинарном изображении программа выделяет отдельные включения. Далее проводили компьютерное сканирование каждого включения сеткой с определенным размером ячейки. Сканирование включения программой осуществляется несколько раз. На каждом следующем эта-

промежутках и фактически вписывается в определенные ограничения, диктуемые первичной γ -фазой. При этом фрактальная размерность графитовой фазы как геометрического объекта будет ниже, чем у дендритов аустенита.

пе сканирования сторона ячейки сетки увеличивается на один пиксель в соответствии с арифметической прогрессией. На рис. 4 представлены отдельные этапы сканирования продольного среза включения пластинчатого графита, наблюдаемого в плоскости шлифа серого чугуна. Число этапов определяется максимальным размером ячейки сетки, которая равномерно заполняет сканируемое включение. Так, для включения, представленного на рис. 4, число этапов при сканировании ячейками возрастающего размера составило 46.

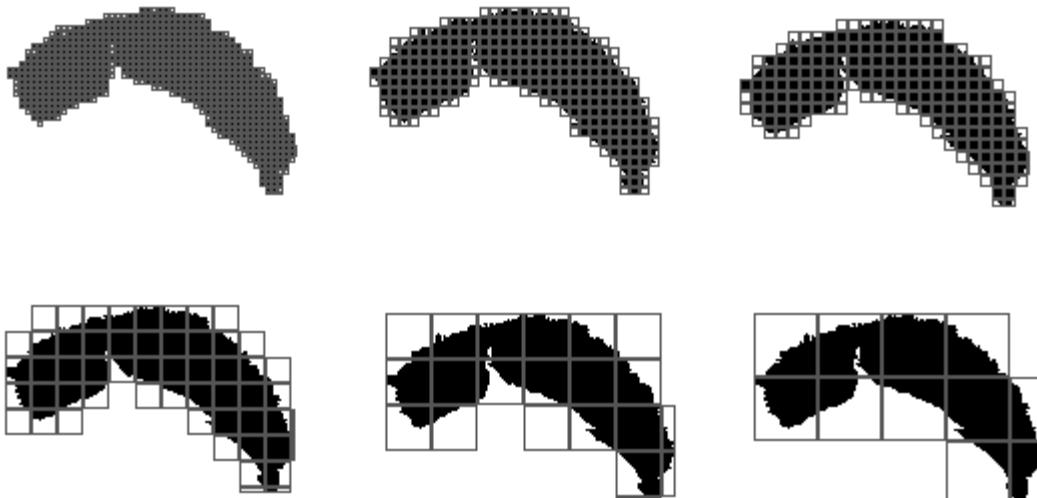


Рис. 4. Результаты отдельных этапов сканирования графитового включения по методу сеток

На каждом этапе определяются количество ячеек, содержащих пиксели изображения включения (F), и их размер (ε), который вычисляется как отношение площади ячейки к общей площади изображения. Эти параметры используются в расчете фрактальных размерностей по формуле, аналогичной (1):

$$D_{\beta} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln F}{\ln \varepsilon}.$$

Фрактальная размерность определяется по углу наклона линии тренда, построенной по методу наименьших квадратов в координатах $(-\ln \varepsilon) - \ln F$ (рис. 5). При использовании статистического подхода фрактальная размерность является вероятностной (D_{β}), и для оценки правильности результатов дополнительно определяется коэффициент детерминации r^2 . Для всех проведенных экспериментов коэффициент

детерминации показал высокую степень взаимосвязи усредненной линии тренда и

расчетных параметров: $r^2 \in [0,92; 0,99]$.

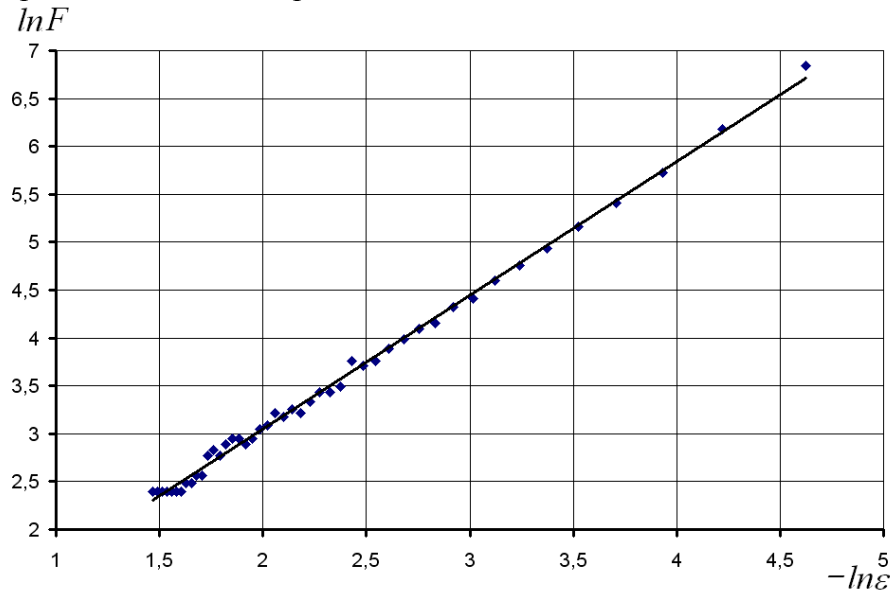


Рис. 5. Графический метод определения вероятностной фрактальной размерности по наклону линии тренда

Перед исследованием микроструктур различных чугунов были проведены калибровочные замеры стандартных шкал изображений, представленных в прил. 3 к ГОСТ 3443-87. Такой анализ позволил сопоставить фрактальные размерности со стандартизированной формой графитовых включений. Первоначально шкала фрактальных размерностей включений, наблюдаемых в плоскости шлифа, была принята от $D_\beta = 1$ (для отрезка) до $D_\beta = 2$ (для идеального круга в плоскости). При исследовании стандартных изображений шкал ГОСТ 3443-87 не было обнаружено включений с идеальной круглой формой, поэтому верхнее значение интервала было уменьшено до $D_\beta = 1,9$. Диапазон фрактальных размерностей охватывает все наблюдаемые при исследованиях включения графита в чугунах (по ГОСТ 3443-87).

Диапазон фрактальных размерностей был разделен согласно шкалам ГОСТ

Результаты исследования

Примеры использования фрактального анализа для идентификации графитовых включений в чугунах различных марок представлены на рис. 6.

Микроструктура серого чугуна, полученная после фрактального анализа образца сечением 35 мм, изображена на рис. 6 а. В центре эвтектической колонии,

3443-87 на пять ступеней компактности графита. Первая ступень (1,0...1,09) соответствует пластинчатой игольчатой форме графита (ПГф3), вторая (1,1...1,29) - пластинчатой прямолинейной (ПГф1), третья (1,3...1,49) - пластинчатой завихренной (ПГф2) и гнездообразной (ПГф4), а также вермикулярной извилистой (ВГф2), четвертая (1,5...1,69) - вермикулярной узелковой (ВГф1) и утолщенной (ВГф3), а также структуре ковкого чугуна - нитевидной (КГф1) и хлопьевидной (КГф2) формам. Последняя, пятая ступень (1,7...1,9) включает компактную форму включений ковкого чугуна (КГф3) и всю шкалу, относящуюся к чугуну с шаровидным графитом (ШГф1...ШГф5). Для упрощения идентификации графитовых включений была использована цветовая шкала, на которой отдельным ступеням диапазона фрактальных размерностей были присвоены свои цвета.

наблюдаемой в левой верхней части изображения, выявлены прямолинейные графитовые включения, которые соответствуют второй ступени фрактальной шкалы. Однако в структуре преобладают включения графита, отвечающие третьей ступени. Они имеют утолщенную форму и гораздо более протяженные размеры, чем включения второй ступени. Включения,

попавшие в разрез плоскости шлифа продольными, отличаются более крупными размерами и компактной формой. Они

классифицируются программой как относящиеся к более высокой степени компактности

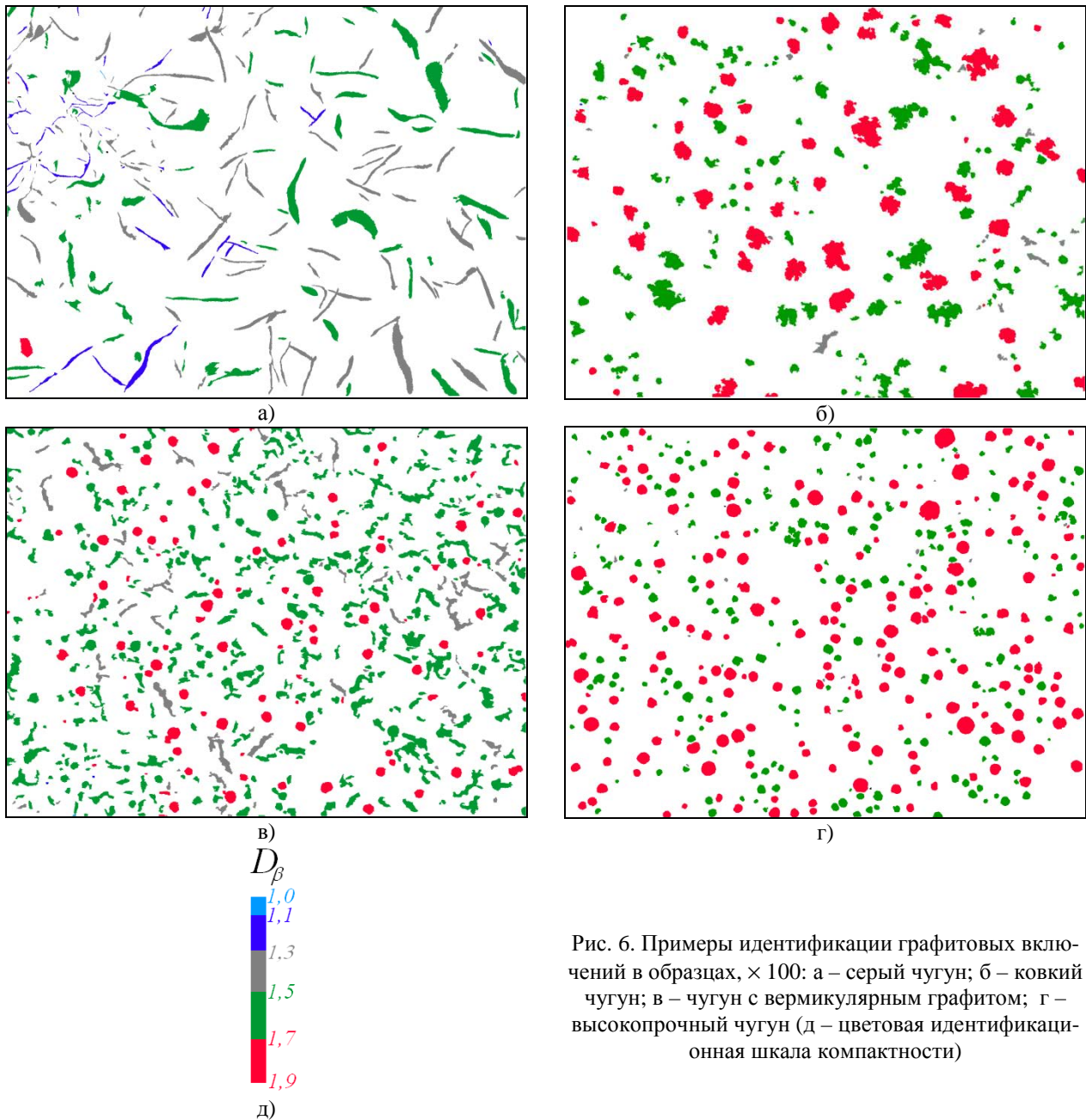


Рис. 6. Примеры идентификации графитовых включений в образцах, $\times 100$: а – серый чугун; б – ковкий чугун; в – чугун с вермикулярным графитом; г – высокопрочный чугун (д – цветовая идентификационная шкала компактности)

На рис. 6 б представлено изображение микроструктуры ферритного ковкого чугуна. В структуре преобладают компактные включения, которые по фрактальным размерностям относятся к четвертой и пятой ступеням.

Структура образца из чугуна с вермикулярным графитом (рис. 6 в) содержит включения трех ступеней компактности, кроме двух первых. В локальных областях выявлены компактные включения шаровидной формы. Вермикулярная извилистая форма графитовых включений (ВГф2) от-

носится к третьей ступени шкалы. В структуре преобладает компактная форма графитовых включений, относящаяся к четвертой ступени шкалы компактности.

Микроструктура высокопрочного чугуна, использованная для фрактального анализа, представлена на рис. 6 г. Мелкие включения неправильной конфигурации, наблюдаемые в структуре, имеют компактную форму, относящуюся к четвертой ступени шкалы. Крупные включения графита идентифицированы как шаровидные.

Помимо формы графитовых включений при компьютерном анализе можно численно определить параметры, характеризующие количество, размер и распределение графитовой фазы в чугунах.

Количество графитовой фазы в чугуне вычисляется из отношения количества черных пикселей ($C_{гр}$), которые характеризуют содержание графитовой фазы, наблюдаемой в плоскости нетравленного шлифа, к общему количеству пикселей изображения ($C_{из}$):

$$S_{gp} = \frac{C_{gp}}{C_{из}} \cdot 100\%.$$

Размер графитовых включений оценивается по отношению суммы площадей графитовых включений (F_i) к общему числу включений (n), сегментированных на изображении микроструктуры:

$$A_{gp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} F_i}{n}.$$

Формула позволяет определить показатель, характеризующий среднюю площадь графитовых включений в пикселях.

Важным параметром для описания стохастических фрактальных структур является лакунарность. Термин «лакунарность» был впервые использован Б. Мандельбротом [10]. Мерой лакунарности (Λ) является изменение плотности изображения агрегата.

$$\Lambda = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2, \quad (2)$$

где σ – стандартное отклонение массы (для бинарного изображения – количество пикселей) фрактального агрегата в ячейках сетки заданного размера ε ; μ – среднее значение массы агрегата в ячейках заданного размера ε .

Для оценки распределения графитовых включений необходимо использовать не локальный анализ отдельных включений, а общий фрактальный анализ всего изображения. При этом используется лакунарность, которая характеризует неоднородность заполнения изображения пикселями, относящимися к графитовой фазе. Расчет лакунарности выполняется по формуле (2).

Лакунарность является мерой неоднородности заполнения пространства объектом. Чем выше лакунарность, тем больше в изучаемом распределении имеется разреженных областей. Аналогично в анализируемом изображении микроструктуры чугуна часть графитовых включений скрыта металлической матрицей, программой она воспринимается как пустота. Чем меньше величина лакунарности, тем больше пустых областей на изображении и, следовательно, более неравномерно распределена графитовая фаза.

Результаты вычисления параметров графитовой фазы в чугунах различных марок представлены в таблице.

Таблица

Результаты вычисления морфологических параметров графитовой фазы в различных классах графитизированных чугунов

	Оцениваемый параметр графитовых включений			
	Форма	Размер	Количество	Распределение
Чугун	Средняя фрактальная размерность включений D_β	Средняя площадь включений A_{gp} , пкс	Содержание графитовой фазы на изображении S_{gp} , %	Лакунарность изображения Λ
Серый (рис. 6 а)	1,42	815	8,5	1,38
Ковкий (рис. 6 б)	1,63	993	10,6	1,44
С вермикулярным графитом (рис. 6 в)	1,59	547	15,3	1,6
Высокопрочный (рис. 6 г)	1,72	504	11,8	1,46

Все параметры, представленные в таблице, имеют не описательные, а конкретные числовые значения. Они могут быть использованы для разработки мате-

Заключение

Итак, с использованием метода фрактального анализа изображений решена задача вычисления размерно-топологических параметров графитовой фазы. Форма графитовых включений определяется через соответствующую фрактальную размерность, а распределение – через лакуарность, которая характеризует неравномерность заполнения некоего объекта в пространстве.

Метод определения фрактальной размерности может быть использован для

математических моделей взаимосвязи механических свойств и структуры графитизированных чугунов.

анализа процессов структурообразования и оценки процессов эволюции фаз в новых сплавах. Помимо общего исследования изображений микроструктур материалов фрактальный анализ может быть использован для расчета морфологических параметров графитовой фазы, которые не могут быть вычислены по стандартным методикам. К таким параметрам относятся распределение и форма графитовых включений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Falconer, K. *Techniques in Fractal Geometry*/ K. Falconer. – John Wiley & Sons, 1997. – 256 p.
- Imasogie, B. I. Characterization of Graphite Particle Shape in Spheroidal Graphite Iron Using a Computer-Based Image Analyzer/ B. I. Imasogie, U. Wendt // *Journal of Minerals & Materials Characterization*. – 2004. - Vol. 3. – №1. – P. 1-12.
- Li, J. Fractal growth of graphite nodules in iron/ J. Li, L. Lu, M. O. Lai // *Philosophical Magazine Letters*. – 2000. - Vol. 80. – № 9. – P. 633-640.
- Li, J. Quantitative Analysis of the Irregularity of Graphite Nodules in Cast Iron/ J. Li, L. Lu, M. O. Lai // *Materials Characterization*. – 2000. – Vol. 45. – P. 83-88.
- Otávio da Fonseca, M.G. Automatic Classification of Graphite in Cast Iron/ M.G. Otávio da Fonseca, P. Sidnei // *Microscopy and Microanalysis*. – 2005. - Vol. 4. – №11. – P. 363-371.
- Божокин, С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 128 с.
- Волчок, И.П. Сопротивление разрушению стали и чугуна/ И.П. Волчок. – М.: Металлургия, 1993. – 192 с.
- Встовский, Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин. – М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 116 с.
- Золотухин, И.В. Твердотельные фрактальные структуры / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин, В.И. Логинова // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2005. – Т. 29. – № 9. – С. 56-66.
- Литовка, В.И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках/ В.И. Литовка. – Киев: Наукова думка, 1987. – 206 с.
- Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы/ Б. Мандельброт. – М.: Ин-т компьютер. исследований, 2002. – 656 с.
- Перспектива использования метода мультифрактального анализа изображений структуры металла в решении задач обеспечения безопасной эксплуатации технических устройств опасных производственных объектов / А.Д. Анваров, А.С. Маминов, В.А. Булкин, Г.В. Встовский // *Контроль. Диагностика*. – 2006. - № 7. – С. 17-22.
- Соценко, О.В. Оценка компактности включений графита в высокопрочном чугуне/ О.В. Соценко // *Литейное производство*. – 1982. - № 6. – С. 5-8.
- Яковлев, Ф.И. Влияние формы графита и дисперсности мартенсита на механические свойства высокопрочного чугуна/ Ф.И. Яковлев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1986. - № 5. – С. 55-56.
- Li, J. Fractal growth of graphite nodules in iron/ J. Li, L. Lu, M. O. Lai // *Philosophical Magazine Letters*. – 2000. - Vol. 80. – № 9. – P. 633-640.
- Li, J. Quantitative Analysis of the Irregularity of Graphite Nodules in Cast Iron/ J. Li, L. Lu, M. O. Lai // *Materials Characterization*. – 2000. – Vol. 45. – P. 83-88.

5. Otávio da Fonseca, M.G. Automatic Classification of Graphite in Cast Iron/ M.G. Otávio da Fonseca, P. Sidnei // Microscopy and Microanalysis. – 2005. - Vol. 4. – №11. – P. 363-371.
6. Bozhokin, S.V., Fractals and multi-fractals / S.V. Bozhokin, D.A. Parshin. – M.-Izhevsk: Regular and Random Dynamics, 2001. – pp. 128.
7. Volchok, I.P, Resistance to Steel and Cast Iron destruction / I.P. Volchok. – M.: Metallurgy, 1993. – pp. 192.
8. Vstovsky, G.V., Introduction in multi-fractal parameterization of material structures / G.V. Vstovsky, A.G. Kolmakov, I.Zh. Bunin. – M.-Izhevsk: Regular and Random Dynamics, 2001. – pp. 116.
9. Zolotukhin, I.V., Solid-state fractal structures / I.V. Zolotukhin, Yu.E. Kalinin, V.I. Loginova // Alternative Energy and Ecology. – 2005. – Vol. 29. – № 9. – pp. 56-66.
10. Litovka, V.I. Quality Increase in High-duty Cast Iron in Foundry Goods/ V.I. Litovka. – Kiev: Scientific Thought, 1987. – pp. 206.
11. Mandelbrot, B. Fractal Geometry of Nature / B. Mandelbrot. – M.: Institute of Computer Researches, 2002. – pp. 656.
12. Outlooks in application of multi-fractal analysis method for metal structure images in solution of problems in ensuring safety of hardware operation of dangerous industrial objects / A.D. Anvarov, A.S. Maminov, V.A. Bulkin, G.V. Vstovsky // Control. Diagnostics. – 2006. - № 7. – pp. 17-22.
13. Sotsenko, O.V., Compactness estimation of carbon flecks in high-duty cast iron/ O.V. Sotsenko // Foundry. – 1982. - № 6. – pp. 5-8.
14. Yakovlev, F.I., Influence of graphite form and martensite dispersity upon stress-strain properties of high-duty cast iron/ F.I. Yakovlev // Metal Science and Metal Thermal Treatment. – 1986. - № 5. – pp. 55-56.

Статья поступила в редколлегию 2.11.2015.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Томай А.В.*

Сведения об авторах:

Макаренко Константин Васильевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: makkon1@yandex.ru.

Makerenko Konstantin Vasilievich, D.Eng., Prof., Head of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: makkon1@yandex.ru.

Илюшкин Дмитрий Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: shirke@mail.ru.

Pyushkin Dmitry Alexeyevich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “mechanical Engineering and Material Science”, Bryansk State technical University, e-mail: shirke@mail.ru.