Машиностроение и машиноведение

УДК 666.293.11:528.854.2
DOI: 10.30987/1999-8775-2021-9-4-14

К.В. Макаренко, А.Н. Поддубный, С.В. Глушенок, Е.А. Зенцова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИТОВОЙ ФАЗЫ В ЧУГУНАХ МЕТОДОМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЕГО МИКРОСТРУКТУРЫ

Представлен метод распознавания включений графитовой фазы и определения таких геометрически сложных размерно-топологических параметров, как форма и распределение, которые нельзя определить стандартными методами цифровой микроскопии. Метод основан на фрактальном анализе изображений микроструктур графитизированного чугуна. Для определения неравномерности распределения графитовой фазы в объеме микроструктуры предложено использовать такую функцию как лакунарность.

Ключевые слова: чугун, графитовая фаза, микроструктура, фрактальный анализ, параметры, форма, распределение.

K. V. Makarenko, A. N. Poddubny, S. V. Glushchenko, E. A. Zentsova

DETERMINATION OF THE DIMENSIONAL AND TOPOLOGICAL PARAMETERS OF THE GRAPHITE PHASE IN CAST IRON BY FRACTAL ANALYSIS OF IMAGES OF ITS MICROSTRUCTURE

The basics of metallography and modern systems used for studying and analyzing the structures of materials are described. Special attention is paid to the techniques of quantitative microscopy, as a kind of ancestress of modern microstructure analysis systems. The analysis of modern computer programs used to analyze images of microstructures obtained from digital microscopes is presented. The basics of fractal analysis as a highly effective tool for calculating numerical values of parameters of geometrically complex objects are outlined. Using the example of the analysis of graphitized cast iron structure, the application of the fractal analysis method to determine such characteristics of the graphite phase as the shape of graphite inclusions and their distribution in the alloy volume is demonstrated. As part of the study, various classes of cast iron have been studied, such as graphitic pig iron with flaked graphite, cast iron with vermicular graphite, and high-grade cast iron with spheroidal graphite. To determine the shape of graphite inclusions, a fractal dimension has been proposed to be used, and the unevenness of the distribution has been estimated using such a function as lacunarity. The individual stages of determining these characteristics using a specialized FracLac module applied in the structure of the ImageJ program are presented. The obtained results showed high adequacy. Despite positive assessment, the shortcomings identified during the research on the use of fractal analysis methods for identifying geometrically complex dimensional and topological parameters inherent in the graphite phase in cast iron are noted. The ways for further improvement of these methods for solving a wide range of problems in metallography of alloys are proposed.

Key words: cast iron, graphite phase, microstructure, fractal analysis, parameters, shape, distribution.

До относительно недавнего времени металлографические исследования ограничивались микроскопом и методами оптической микроскопии. Последняя — одна из разновидностей микроскопии, которая получила широкое применение в металлографии, так как отвечает всем ее требованиям. Металлографический микроскоп — это оптический прибор, работающий в видимом диапазоне электромагнитного спектра с непрозрачными для этого спектра объектами, а следовательно, основан на принципе отражения света [1–3].

В металлографии всегда существовала проблема верификации результатов исследований. Традиционно операции по обработке результатов, распознаванию, классификации изучаемых структур материалов ложились на плечи исследователя, который нес ответственность и за точность представляемых вердиктов [4]. Из применяемых методов по распознаванию и классификации структур основным был метод

визуального оценивания, основанный на сравнении реального строения материалов с эталонными изображениями. При таком подходе от металлографа требовались глубокие знания в области формирования структуры материалов. Учитывая тесную взаимосвязь в системе: химический состав структура свойства, и ключевую роль структуры материала в формировании механических, физико-химических, эксплуатационных и ряда технологических свойств были разработаны методы количественной металлографии [5]. Данные методы основаны на использовании различных размерно-топологических параметров, которые позволяют численными и описательными методами охарактеризовать наблюдаемую структуру материала. Классические методы количественной металлографии отличаются высокой трудоемкостью и требуют от металлографа специальных навыков: усидчивости, терпения и умения сконцентрироваться на проводимых исследованиях. В ходе работы ему приходится учитывать множество параметров и характеристик различных фаз материалов, и сложность задачи растет в арифметической прогрессии с ростом числа фаз, представленных в исследуемом материале. С учетом выше сказанного возрастает риск ошибок в ходе проводимого исследования. Между тем, данные исследования крайне востребованы в металловедении с позиции разработки математических моделей влияния структуры материала на его свойства. Такие модели позволяют при установленных взаимосвязях размерно-топологических параметров структуры и свойств материалов разрабатывать новые сплавы с уникальными свойствами.

В настоящее время методы количественной металлографии находятся на этапе становления. С ростом цифровизации и применения компьютерной техники в металлографии получило развитие новое направление микроскопии — цифровая (компьютерная) микроскопия [6], которая основана на анализе изображений различных структур с помощью специального аналитического комплекса. Такие комплексы или анализаторы изображения (АИ) состоят из системы ввода (металлографический микроскоп и камера), компьютера и специализированного программного обеспечения (ПО), которое базируется на алгоритмах обработки изображений микроструктур материалов. В современных АИ используют микроскопы разных видов: прямые — универсальные приборы с широкими возможностями по их усовершенствованию; инвертированные — аппараты без фокусировки, когда весь образец находится в поле зрения объектива, они имеют меньшую стоимость по сравнению с прямыми микроскопами; инспекционные оптические приборы предназначены для изучения и ремонта микроэлектроники. По своему функционалу АИ могут быть исследовательского или специализированного классов. Исследовательские приборы высокого уровня могут работать в любых условиях и решают любые задачи, имеют открытую систему, что позволяет расширять возможности, а также вносить изменения в методики, что делает их универсальным инструментом. Специализированные АИ работают в крайне ограниченных условиях по одной методике и решают задачи одной конкретной области, например, черная металлургия, сварка, микроэлектроника и т.д.

Как было сказано выше, технологию работы АИ определяет применяемое ПО. Это программы для работы с изображениями [7]. Они имеют свое конечное назначение и применяются для решения определенных задач, но, несмотря на это, обладают рядом общих возможностей. Для работы с изображением есть возможность формировать его как в бинарном (черно-белом) виде, так и в цветном, применяя для этого несколько моделей. Самой популярной моделью цветового пространства является *RGB,* а менее популярной — *HSB*(*HSL*). На этапе ввода изображения можно провести ряд настроек цвета, яркости, контрастности, глубины резкости и других, чтобы получить оптимальное для анализа изображение микроструктуры. Сравнение, редактирование и преобразование позволяют сравнивать изображения визуально или наложением друг на друга; редактировать для исправления дефектов ввода (так называемых артефактов) или

для нанесения заметок и записей, что не несет никакого вреда для изображения; преобразование используется для улучшения визуализации или для подготовки к распознаванию объектов на изображении. Возможность измерения позволяет определить сколько пикселей на изображении занимает объект и увидеть результат в метрических единицах. Можно классифицировать объекты по ряду параметров, и чем больше будет таких параметров, тем лучше будет результат и больше информации будет извлечено из изображения. Как правило, сначала выделяют объект по цвету или яркости — такое выделение основано на том, что каждой цветовой составляющей соответствует свой интервал, а интервалу яркости — определенный объект. Заниматься этим может как сам пользователь, так и специальный алгоритм. Затем объекты классифицируют. Занимается этим так же пользователь или специальный классификатор на алгоритме, использующий накопленные (экспертные) знания для работы (статистический классификатор) или нейронную сеть, обучаемую специалистом. Можно еще выделить возможности статистической обработки результатов для проверки их достоверности, построения графических зависимостей на основе заложенных в программу математических моделей, а также для создания и записи целой методики, которую можно потом неоднократно использовать для решения типовых задач. Кроме этого, можно определять параметры и характеристики объектов на изображении, такие как: площадь [8], диаметр, длина и ширина, даже периметр, который невозможно определить вручную, что делает такие программы еще ценнее; проводить оценку ошибок [9] и анализ «несвязанных объектов».

Среди всего многообразия программ можно выделить, если не самые популярные, то наиболее успешные. Сравнительный анализ программ представлен в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ программ, используемых для анализа изображений микроструктур материалов

Программа	Особенности
Photom	Обладает разнообразным функционалом по обработке и анализу изображений, как и все подобные программы. Считается самой простой в освоении и использовании программой. Предназначена для цифровой фотометрии.
Avizo	Предназначена для работы с изображениями микроструктур, определении их дефектов, а также определении основных морфологических параметров.
Optimas	Программа объединяет в себе множество различных проверенных методов как обработки изображений, так и математических методов. Отличительной особенностью является наличие двух панелей управления: стандартной — управление по умолчанию, и пользовательской с возможностью записи до 20 макросов, которые упрощают работу с программой.
Image Expert Pro	Целью программы является определение качественных и количественных характеристик, присутствует возможность записи методик, представление и хранение результатов осуществляется в любой форме: таблицы, гистограммы, изображение и т. д. Есть возможность работать с камерой удаленно и настраивать оптическую систему комплекса
Видеотест	Программа имеет аналогичные возможности, есть возможность распределять объекты по их яркости, а также определять геометрические формы в трехмерном пространстве благодаря интеграции в программу успешных оптических методов.
Smart-eye	Имеется возможность определения качественных и количественных характеристик любого материала, конечной задачей является статистическая обработка результатов и построение графических зависимостей.
ImageJ	Программа для обработки и анализа изображений с открытым исходным кодом, написанная *National Institutes of Health* [10] на языке *Java*, что позволяет автоматизировать сложные повторяющиеся действия [11]. Открытый код позволяет добавлять дополнительные модули (плагины) людям, не являющимся разработчиками. Плагины позволяют расширить функционал программы и проводить визуализацию вплоть до рентгенологических изображений [12].
JmicroVision	В целом непримечательная программа аналогичная другим с подобными возможностями и функционалом.

Окончание табл. 1

Программа	Особенности
Endrov	Программа с открытым исходным кодом для обработки и анализа изображений, основана на языке *Java* и большей части философии *ImageJ*, но старается заменить ее при помощи современного дизайна. Программа построена так, чтобы разграничивать код графического интерфейса от других данных, модулей и фильтров, а также их между собой. Упор делается на то, чтобы уменьшить избыточность кода и упростить обслуживание. Данную программу можно считать приемником, учеником ImageJ, который в своем становлении свернул не туда, пытаясь привлечь внимание. Продукт совмещает в себе и библиотеку данных, и программу для визуализации, при этом разделяя все между собой и нарушая обратную совместимость ради дизайна, считая, что большое количество плагинов без нарушения совместимости приводят к ошибкам в дизайне. Из особенностей можно выделить обработку дополнительных измерений, что важно для серьезной микроскопии, еще у программы есть собственный формат изображений, что не мешает ей поддерживать и другие наиболее распространенные форматы.
OpenCV	Совокупность алгоритмов обработки изображений, компьютерного зрения и других общих алгоритмов, построенных на языке *C/C++*, а также идет разработка и на других популярных языках *Java, Python, Matlab* и другие. Включает несколько узконаправленных компактных модулей: обработка изображений, математические модели, модели машинного обучения, отслеживание движения и обнаружение объектов на изображении, калибровка камеры и другие.

Существуют и другие специализированные программы, используемые для решения задач оптической микроскопии. Например, производители цифровых микроскопов предоставляют покупателю трial-версии специализированного фирменного ПО для решения задач металлографии. Поработав с пробными версиями ПО, потребитель может принять решение приобрести лицензионный вариант программы.

Графическое представление информации всегда было и есть наиболее распространенной формой представления данных, а с появлением таких аналитических комплексов работа с изображениями намного упростилась, но параллельно с облегчением появилась возможность решать все более сложные, многоуровневые задачи и проводить множество исследований по обработке и анализу изображений. Все это потребовало разработки и новых методов, и подходов. Одним из таких методов и является метод, основанный на фрактальном анализе [13], а точнее на теории фракталов и фрактальной геометрии [14]. С помощью такого метода можно описывать геометрически сложные объекты, к которым относится и графит в чугунах, через единый параметр, которым является фрактальная размерность.

Фрактал в переводе с французского обозначает «состоящий из фрагментов». Это геометрический объект или подмножество пространства, которому свойственно самоподобие, и фрактальная размерность которого больше топологической. В рамках теории фракталов можно анализировать изображения различных микроструктур материалов [15].

В целом фрактальный анализ [16] — это метод, целью которого является оценивание и присвоение набору данных изображения фрактальных характеристик, к которым относится основная и самая распространенная — размерность, определяющая сложность объекта; коэффициент формы и энтропия. Фрактальный анализ состоит из нескольких методов [17]: мультифрактальный анализ, анализ лакунарности, массовые методы и подсчет ящиков. Объединяет все эти типы анализа необходимость в эталонных паттернах для истолкования и оценивания получаемых результатов.

Самым простым и распространенным типом анализа является подсчет ящиков, известный также как метод сеток. Суть метода заключается в сборе данных для анализа посредством разбиения изображения сеткой на ячейки постепенно изменяющегося размера. Сбор данных или сканирование происходит в несколько этапов, при

этом на каждом следующем этапе размеры ячеек увеличиваются. Фрактальной характеристикой изображения здесь служит фрактальная размерность, которая определяется по следующей формуле:

$$D = \lim_{\varepsilon \to 0} \left(\frac{lnN}{ln\varepsilon} \right), \quad (1)$$

где N – количество ячеек с размером ε.

Алгоритм метода сеток имеет несколько схем сканирования, которые определяют, как будет происходит сбор данных, а по факту, как будет перемещаться сетка при сканировании изображения. Традиционной схемой является фиксированное сканирование не перекрывающейся сеткой — многократное наложение сетки, так что ячейки сетки нигде не перекрываются и не перекрывают то место, где были ранее. Это повторяется до тех пор, пока вся интересующая область изображения не будет отсканирована. Другая схема — сканирование скользящей сеткой, когда каждая ячейка сетки, перемещаясь по изображению, перекрывает предыдущее свое положение. Такой подход часто применяется в анализе лакунарности и мультифрактальном анализе. И, наконец, третья схема — субдискретизация и локальные измерения применяется для определения локальных вариаций, когда сетка перемещается в соответствии с некоторой функцией, связанной с тем участком, который сканируют.

Целью настоящих исследований является разработка метода анализа изображений микроструктур графитизированных чугунов, основанных на фрактальном анализе, который позволит идентифицировать форму графитовых включений по одному параметру — фрактальной размерности.

Итак, предлагаемый метод основан на фрактальном анализе, а точнее применяется рассмотренный выше метод сеток. Сбор данных осуществляется фиксированным сканированием изображения микроструктуры не перекрывающейся сеткой. Метод реализуется на базе программы *ImageJ* [18], при помощи ее специализированного плагина *FracLac*. *ImageJ* – программа, бесплатно распространяемая, кроссплатформенная, с открытым исходным кодом, за счет чего может быть расширена созданием дополнительных модулей (плагинов) и написанием макрокоманд, построена на языке *Java*, что повышает быстродействие. ПО работает с 8-ми, 16-ти и 32-х битными изображениями, а также поддерживает различные форматы. Есть функция создания стеков — серии изображений в отдельном окне, программа адаптирована под многопроцессорные системы. Имеет как стандартные функции обработки изображений, так и возможности проводить арифметические и логические операции с изображениями, вычислять статистические и геометрические показатели, строить гистограммы, графики и другие геометрические зависимости. Можно работать с неограниченным количеством изображений, количество зависит от объема доступной памяти. *FracLac* – это дополнительный модуль (плагин) для *ImageJ*, также находящийся в свободном доступе, образован от двух слов фрактал и лакунарность, что указывает на его специализацию. Применяется для работы с цифровыми изображениями, в частности, для измерения морфологических признаков геометрически сложных для описания объектов. Работает с бинарными изображениями, а, касаемо нашего случая, позволяет определять фрактальную размерность несколькими способами.

В исследованиях использовались изображения микроструктур нескольких типов чугунов с различной формой графита: серый чугун (СЧ) с пластинчатым графитом (рисунок 1, а), чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) (рисунок 1, б) и два изображения высокопрочного чугуна (ВЧ) с шаровидным графитом (рисунок 1, в и г). Так как для работы модуля *FracLac* необходимы бинарные изображения, то была проведена бинаризация изображений и удаление различных артефактов, которые могли негативно повлиять на точность результатов.

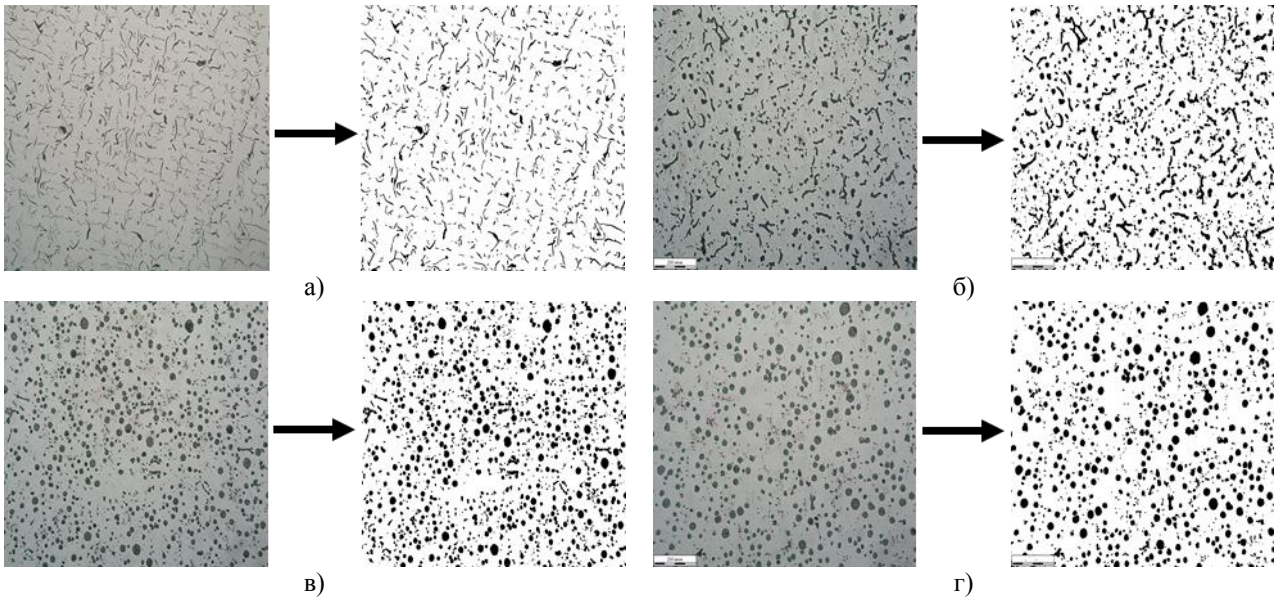

Рис. 1. Исходные и бинарные изображения микроструктур чугунов с различной формой графита: а - СЧ с пластинчатым графитом; б - ЧВГ; в - ВЧ с шаровидным графитом №1; г - ВЧ с шаровидным графитом №2

Последующий анализ проводится в соответствии с алгоритмом работы методы сеток. Первоначально задается диапазон размеров ячеек сетки: минимальный размер — 1 пиксель (минимально допустимый размер), максимальный — 45 % от изображения (оптимальный параметр, так в случае, если его значение меньше — падает точность, а более 50 % могут возникнуть ошибки, между размерами 45 % и 50 % от изображения разницы в результатах замечено не было). Если оставить выбор в количестве этапов сканирования за программой, то она предлагает матрицу значений (рисунок 2), в соответствии с которой будет происходить сканирование (рисунок 3) и размер сетки будет увеличиваться в арифметической прогрессии до момента, когда прогрессия не достигнет максимально заданного размера ячейки, в этом случае между предпоследним и последним числовым значением произойдет флуктуационный скачок, который отразится на резком увеличении размера сетки. Кроме выбора параметров размеров сетки, задаются начальные значения графического определения фрактальной размерности и другие возможные параметры фрактального анализа изображений микроструктур чугунов.

```
  1   5   9  13  17  21  25  29  33  37
 41  45  49  53  57  61  65  69  73  77
 81  85  89  93  97 101 105 109 113 117
121 125 129 133 137 141 145 149 153 157
161 165 169 173 177 181 185 189 193 197
201 205 209 213 217 221 225 229 233 237
241 245 249 253 257 261 265 269 273 277
281 285 289 293 297 301 305 309 313 317
321 325 329 333 337 341 345 349 353 357
361 365 369 373 377 381 385 389 393 450
```

Рис. 2. Арифметическая прогрессия процесса сканирования (матрица сканирования)

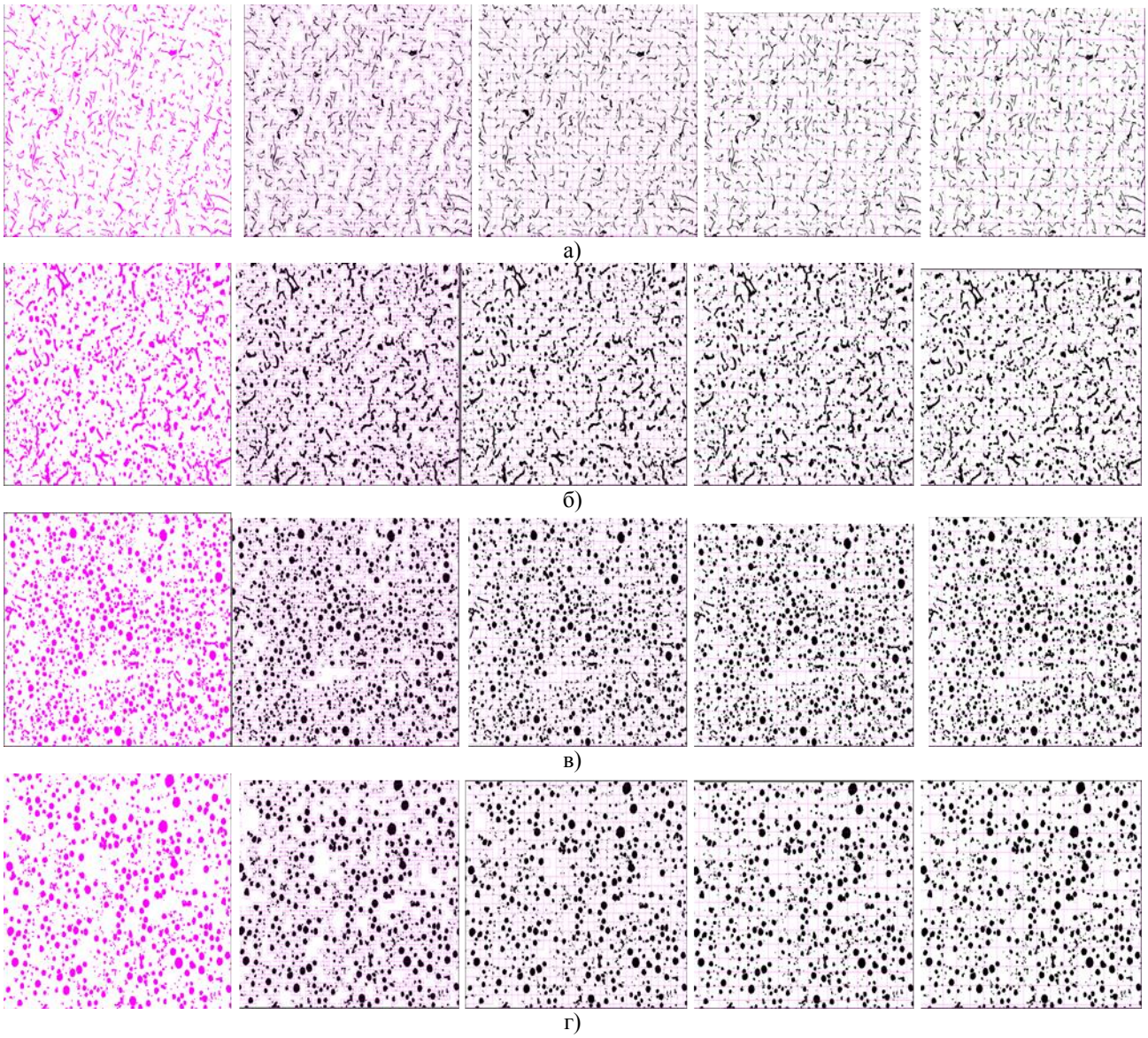

Рис. 3. Отдельные этапы сканирования изображения структуры графитизированных чугунов методом сеток:
а - СЧ с пластинчатым графитом; б - ЧВГ; в - ВЧ с шаровидным графитом №1;
Г - ВЧ с шаровидным графитом №2

Фрактальная размерность на графиках определяется по углу наклона линии тренда, которая строится по методу наименьших квадратов в координатах (–lnε) – ln$F$ (рисунок 4). Кроме того, определяется коэффициент детерминации (r^2) для оценки адекватности полученных результатов. В представленном исследовании корреляция показывает высокую степень взаимосвязи фрактальной размерности (F) с размером ячейки сетки (ε) r^2=0,99.

Кроме фрактальной размерности, характеризующей форму графитовых включений, при анализе можно определить параметры, определяющие количество, размер и распределение. Все эти параметры, характеризующие графитовую фазу в чугунах, представлены в действующем ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры». В соответствии с предлагаемой методикой средний размер графитовых включений определяется из соотношения суммы площадей графита (F_i) к общему числу включений (n):

$$A_{гр} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} F_i}{n}. \quad (2)$$

Количество графитовой фазы определяется из соотношения количества черных пикселей ($C_{гр}$), занимаемых графитом, к общему числу пикселей всего изображения ($C_{из}$):

$$S_{гр} = \frac{C_{гр}}{C_{из}} 100\%. \quad (3)$$

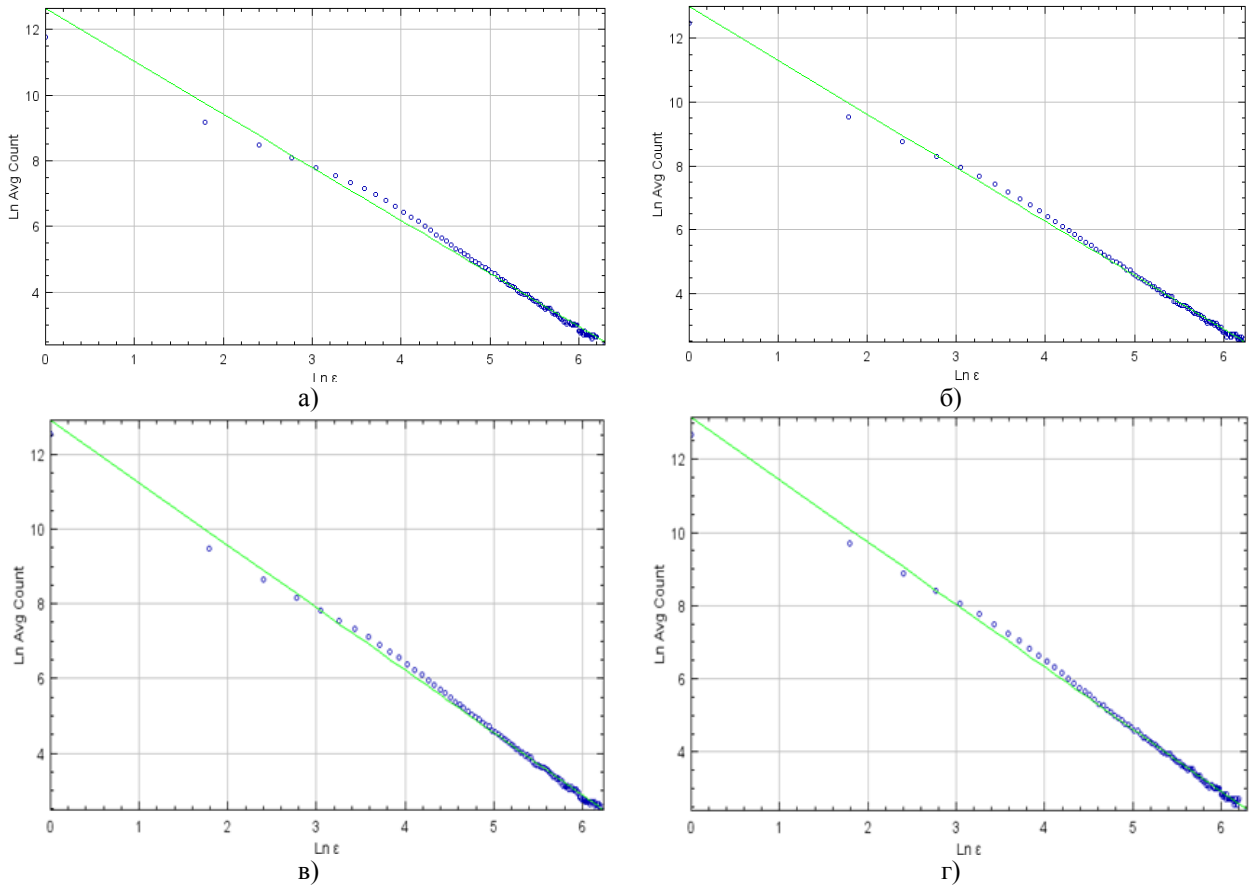

Рис. 4. Графический метод определения фрактальной размерности графитовых включений в чугунах: а - СЧ с пластинчатым графитом; б - ЧВГ; в - ВЧ с шаровидным графитом №1; г - ВЧ с шаровидным графитом № 2

Распределение графитовой фазы в объеме металлической матрицы чугуна характеризуется мерой лакунарности — изменением плотности изображения. Чем меньше значение лакунарности, тем больше на изображении пустот, а значит и распределение графита более неравномерное. Если для определения фрактальной размерности необходимо проводить анализ отдельных включений, то для определения распределения производится общий анализ всего изображения. Вычисляется числовое значение лакунарности по следующей формуле:

$$\Lambda = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2, \quad (4)$$

где σ - стандартное отклонение массы, μ - среднее значение массы изображения.

Как для расчета фрактальной размерности строится графическая зависимость, так и для лакунарности используется графический метод наименьших квадратов. Но необходимо уточнить, что расчет угла наклона линии тренда (рисунок 5) происходит по другой формуле:

$$\Lambda = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1, \quad (5)$$

По данной формуле определяется угол наклона линии тренда, чтобы избежать «неопределенных» вычислений, когда изображение однородно. Однородным считается изображение, когда на разных этапах сканирования число пикселей в ячейках не изменяется и получается, что σ = 0, а, следовательно, и Λ = 0. Такое имеет место быть, но тогда lnΛ тоже равен нулю, а значит и угол наклона линии тренда будет неопределенным.

Обобщенные значения параметров графитовой фазы для различных классов чугунов представлены в таблице 2. Но так как для истолкования и оценки результатов фрактального анализа необходимы эталонные паттерны, то был предложен метод их интерпретации. Метод основан на том, что для оценки используются опыт и знания эксперта — метод экспертного оценивания. Эксперт, исходя из своих знаний и накопленного опыта, а также используя подходы данного метода, производит истолкование результатов и дает экспертную оценку результатов. Согласно предложенному методу и тому, что мы точно знаем какие микроструктуры каких чугунов и с какой фор-

мой графита исследуем, мы можем говорить, что представленные значения фрактальной размерности с разбросом +/- 0,5, так как не все формы графита использовались для анализа, соответствуют данным маркам чугуна и формам графита.

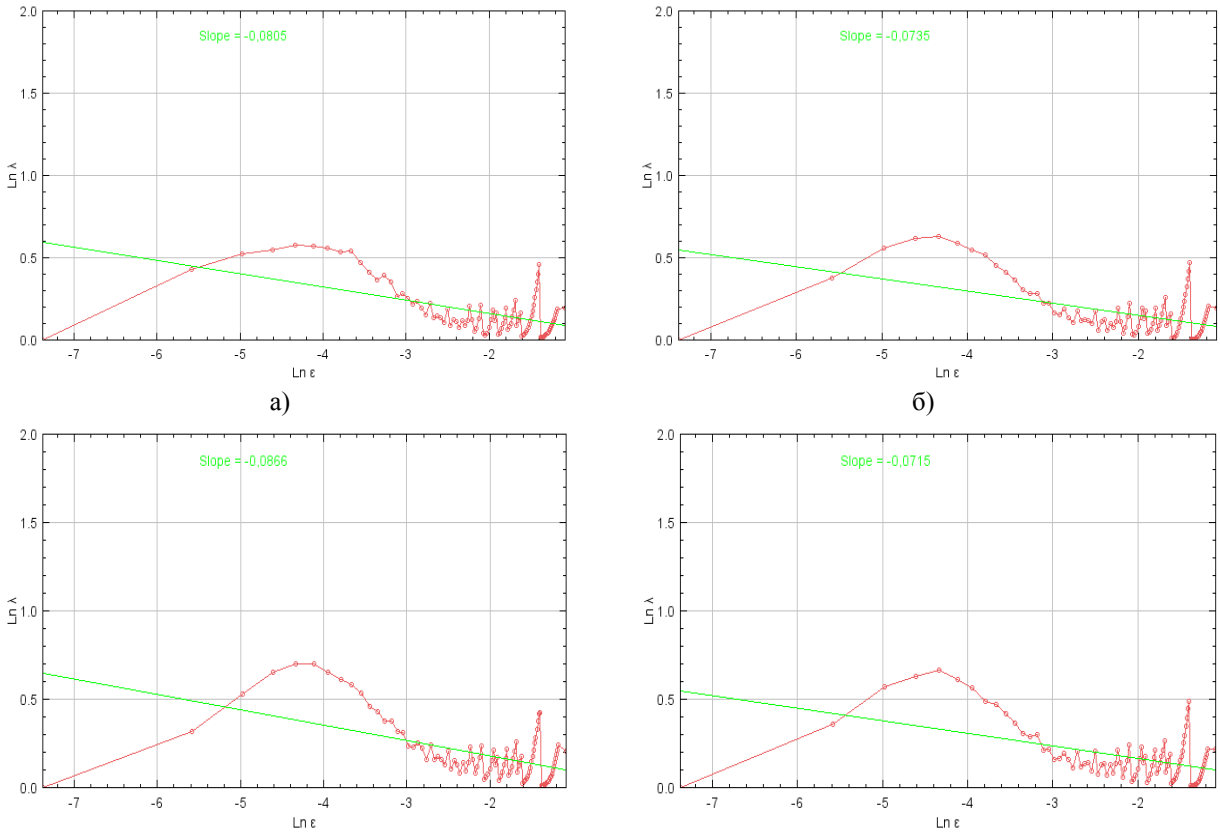

Рис. 5. Графическое представление отдельных этапов определения лакунарности (неравномерности распределения графитовой фазы в объеме чугуна): а - СЧ с пластинчатым графитом; б - ЧВГ; в - ВЧ с шаровидным графитом №1; г - ВЧ с шаровидным графитом №2

Таблица 2

Результаты вычисления размерно-топологических параметров разных типов графитизированных чугунов

Чугун	Параметр графитовых включений			
	Форма	Размер	Количество	Распределение
	D_β	$A_{гр}$	$S_{гр}$	Λ
СЧ	1,61	132,526	6,661	0,28
ЧВГ	1,69	198,653	14,283	0,28
ВЧ №1	1,70	282,865	15,410	0,33
ВЧ №2	1,71	203,998	16,585	0,30

Представленные в табл. 2 результаты имеют числовое значение, поэтому могут быть использованы для построения математических моделей оценки взаимосвязи структуры и свойств графитизированных чугунов.

При помощи метода фрактального анализа можно решать задачи идентификации и определения морфологических параметров различных фаз не только в металлических сплавах, но и композиционных и нано- материалов. Метод можно использовать как для общего анализа изображений, так и для определения таких параметров, как форма и распределение отдельных структурных составляющих и фаз, которые нельзя определить стандартными методами. Но кроме всех достоинств

такого метода он имеет и недостатки:

• значение F не всегда даёт наименьшее число клеток со стороной ε;

• результаты метода фрактального анализа существенно зависят как от внешнего воздействия на объекты исследования, так и от внутреннего «содержания» анализируемых изображений.

Исходя из этого, можно предложить как минимум два направления дальнейшего развития метода фрактального анализа изображений структур материалов. Первый — это учет не только фрактальной размерности при анализе, но и других фрактальных и нефрактальных характеристик, что позволит разработать новые методы, при использовании которых зависимость результатов от воздействий будет минимальной или совсем исчезнет. Другое направление — разработка новых эталонных паттернов, а также методов и подходов для интерпретации и оценки результатов, так как некоторые существующие стандарты и ГОСТы морально устарели и могут не отвечать нынешним высоким требованиям исследований и новым разрабатываемым подходам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анисович, А. Г.** Практика металлографического исследования материалов: монография / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. -Минск: Беларус. наука, 2013. – 221 с.
2. **Тимченко, Е. В.** Цифровая оптическая микроскопия: учеб. Пособие / Е. В. Тимченко, П.Е. Тимченко. – Самара: Изд-во Самар. гос. эрокосм. ун-та, 2015. – 104 с.
3. **Анисович, А. Г.** Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Вести НАН Беларуси. Сер. физ. техн. наук. 2016 № 1. – С. 36–42.
4. **Анисович, А. Г.** Применение поляризованного света в анализе металлов и сплавов / А. Г. Анисович // Литье и металлургия, 2012 № 3(67). – С. 146–151.
5. **Анисович, А. Г.** Визуализация поверхности методом дифференциально-интерференционного контраста / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева // Литье и металлургия, 2013 № 3(72). – С. 156–162.
6. **Пантелеев, В. Г.** Компьютерная микроскопия / В.Г. Пантелеев, О.В. Егорова, Е.И. Клыкова. - М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
7. **Куц, Ю. В.** Современные методы исследования микроструктуры с помощью компьютерного материаловедения с использованием прикладных программ / Ю. В. Куц, А. Ю. Повстяной. - Луцкий национальный технический университет. - С. 323-329.
8. **Анисович, А. Г.** Определение балла зерна стали компьютерными методами / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева, Л. В. Бислюк // Литье и металлургия. - 2010 № 3. - С. 100-104.
9. **Анисович, А. Г.** Оценка ошибок оператора при количественном анализе структуры компьютерными методами / А. Г. Анисович, А. В. Басалай // Литье и металлургия. - 2012. - №4(68). - С. 145-150.
10. **Serra, J.** Image Analysis and Mathematical Morphology / J. Serra. – London: Academic Press.,1992. – P.329.
11. **Повстяной, О. Ю.** Морфологическое описание, анализ и обработка изображений микроструктуры сопел для пескоструйной обработки, которые изготовлены методами порошковой металлургии / О. Ю. Повстяной, В.А. Сичук, В.Д. Рудь, О.В. Заболотний // Научные заметки. – Луцк: ЛНТУ, 2013 – Выпуск 41 С.203-210.
12. **Mardia, K. V.** A spatial thresholding method for image segmentation, IEEE Trans. / K. V. Mardia, T. J. Hainsworth // Pattern Anal. Mach. Intell. 10, (1988). - С. 919–927.
13. **Латыпова, Н. В.** Фрактальный анализ: учеб. пособие / Н. В. Латыпова. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2020. – 120 с.
14. **Мандельброт, Б.** Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: Ин-т компьютер. исследований, 2002. – 656 с.
15. **Соценко, О. В.** Компьютерная DLA-модель формирования шаровидного графита в высокопрочном чугуне / О. В. Соценко. - Национальная металлургическая академия Украины. - Днепропетровск. - С. 3-9.
16. **Крылов, Б. А.** Фрактальный анализ полутоновых изображений / Б. А. Крылов. - С. 112-114.
17. **Привезенцев, Д. Г.** Обзор фрактальных методов цифровой обработки изображений в металлографии / Д. Г. Привезенцев, А. Л. Жизняков. - С. 133-141.
18. **Конюхов, А. Л.,** Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: учеб.-метод. пособие / А. Л. Конюхов. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2012. – 105 с.

1. **Anisovich, A. G.** The practice of metallographic research of materials: monograph / A. G. Anisovich, I. N. Rumyantseva. -- Minsk: Belorusskaya nauka, 2013. - 221 p.
2. **Timchenko, E. V.** Digital optical microscopy: textbook. Manual / E. V. Timchenko, P. E. Timchenko. - Samara: Publ. Samar. gos. erokosm. un-ty, 2015 – - 104 p

3. **Anisovich, A. G.** The art of metallography: the use of optical contrast methods / A. G. Anisovich / / Vesti NAS of Belarus. Ser. phys. tech. nauk. 2016 No. 1 – - pp. 36-42.
4. **Anisovich, A. G.** The use of polarized light in the analysis of metals and alloys / A. G. Anisovich / / Casting and Metallurgy, 2012 No. 3(67). - pp. 146-151.
5. **Anisovich, A. G.** Surface visualization by the method of differential interference contrast / A. G. Anisovich, I. N. Rumyantseva / / Casting and Metallurgy, 2013 No. 3(72). - pp. 156-162.
6. **Panteleev, V. G.** Computer microscopy / V. G. Panteleev, O. V. Egorova, E. I. Klykova. - Moscow: Technosphere, 2005 – - 304 p.
7. **Kuts, Yu. V.** Modern methods of microstructure research using computer materials science using applied programs / Yu. V. Kuts, A. Yu. Povstyanoy. - Lutsk National Technical University. - pp. 323-329.
8. **Anisovich, A. G.** Determination of the steel grain score by computer methods / A. G. Anisovich, I. N. Rumyantseva, L. V. Bislyuk / / Casting and metallurgy. - 2010 No. 3. - p. 100-104.
9. **Anisovich, A. G.** Estimation of operator errors in the quantitative analysis of the structure by computer methods / A. G. Anisovich, A.V. Basalai / / Casting and metallurgy. - 2012. - No.4(68). - pp. 145-150.
10. **Serra, J.** Image Analysis and Mathematical Morphology / J. Serra. – London: Academic Press.,1992. – P.329.
11. **Povstyanoy O. Yu.** Morphological description, analysis and image processing of the microstructure of nozzles for sandblasting made by powder metallurgy methods / O. Yu. Povstyanoy, V. A. Zinchuk, V. D. Rud, O. V. Zabolotny / / Scientific notes. - - Lutsk: NTUU, 2013-Issue 41, pp. 203-210.
12. **Mardia, K. V.** A spatial thresholding method for image segmentation, IEEE Trans. / K. V. Mardia, T. J. Hainsworth // Pattern Anal. Mach. Intell. 10, (1988). - C. 919–927.
13. **Latypova, N. V.** Fractal analysis: textbook. manual / N. V. Latypova. - Izhevsk: Publishing center "Udmurt University", 2020. - 120 p.
14. **Mandelbrot, B.** Fractal geometry of nature / B. Mandelbrot. - M.: In-t computer. research, 2002 – - 656 p.
15. **Sotsenko, O. V.** Computer DLA-model of the formation of spheroidal graphite in high-grade cast iron / O. V. Sotsenko. - National Metallurgical Academy of Ukraine. - Dnepropetrovsk. - pp. 3-9.
16. **Krylov, B. A.** Fractal analysis of grayscale images / B. A. Krylov. - pp. 112-114.
17. **Priezentsev, D. G.** Review of fractal methods of digital image processing in metallography / D. G. Priezentsev, A. L. Zhiznyakov. - pp. 133-141.
18. **Konyukhov, A. L.,** Guide to the use of the ImageJ software package for image processing: textbook.-method. manual / A. L. Konyukhov. - Tomsk: Department of TU, TUSUR, 2012. - 105 p.

Макаренко, К.В. Определение размерно-топологических параметров графитовой фазы в чугунах методом фрактального анализа изображений его микроструктуры / К.В. Макаренко, А.Н. Поддубный, С.В. Глушенок, Е.А. Зенцова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 9. – С. 4-14 . DOI: 10.30987/1999-8775-2021-9-4-14.

Статья поступила в редакцию 13.05.21.
Рецензент: д.т.н., профессор Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН, Химухин С.Н.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 26.08.21.

Сведения об авторах:

Макаренко Константин Васильевич, д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение и материаловедение», Брянский государственный технический университет, e-mail: makkon1@yandex.ru.
Поддубный Анатолий Никифорович, д.т.н., доцент, советник ген. директора «Инженерного центра ядерных контейнеров», г. Москва, e-mail: anatoliypoddu@yandex.ru.

Глушенок Сергей Викторович, магистрант, Брянский государственный технический университет, e-mail: sergey.glushenok97@yandex.ru.
Зенцова Екатерина Александровна, ст. преподаватель кафедры «Машиностроение и материаловедение», Брянский государственный технический университет, e-mail: kopilka.32@mail.ru.

Makarenko Konstantin Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Bryansk State Technical University**,** e-mail: makkon1@yandex.ru.
Poddubny Anatoly Nikiforovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Adviser Director General of the "Engineering Center for Nuclear Containers", e-mail: anatoliypoddu@yandex.ru.

Glushenok Sergey Viktorovich, Master's Degree Student, Bryansk State Technical University, e-mail: sergey.glushenok97@yandex.ru.
Zentsova Ekaterina Aleksandrovna, Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Bryansk State Technical University,e-mail: kopilka.32@mail.ru.