

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.14.018.95:519.237.8:004.932

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-82-92



МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПО ЦИФРОВОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ

Башков А.А.¹, Аносов М.С.¹, Иванов С.В.¹, Баженов Е.О.¹, Акулова А.А.¹, Чичеватов А.В.²¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия²Филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седатова», Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В современной количественной металлографии актуальной задачей является разработка объективных методов оценки сложности и морфологии микроструктуры металлических материалов на основе анализа цифровых изображений. Традиционные методы визуального анализа во многом зависят от субъективной интерпретации исследователя, что ограничивает воспроизводимость результатов. В связи с этим перспективным направлением является применение методов фрактального анализа, позволяющих описывать геометрическую сложность микроструктурных элементов с использованием количественных параметров. Целью работы является исследование возможностей использования фрактальной размерности для количественной характеристики микроструктуры различных марок сталей по цифровым микрофотографиям. Объектами исследования являлись стали 20Х13, У10А, 50 и 12Х18Н10Т. Для обработки изображений и расчёта фрактальной размерности применялись методы фрактального анализа, включая дифференциальный метод подсчёта ячеек, реализованный в разработанном программном обеспечении (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU №2024660065), а также классический алгоритм box-counting, реализованный в среде MATLAB R2021b. Научная новизна работы заключается в сравнительном применении различных алгоритмов расчёта фрактальной размерности к цифровым изображениям микроструктур сталей и в интерпретации полученных значений с позиции физики металлов. Показано, что значения фрактальной размерности отражают особенности морфологии микроструктурных элементов — границ зёрен, карбидных выделений и мартенситных структур. Полученные результаты демонстрируют возможность использования фрактального анализа для перехода от качественного описания микроструктуры к количественным параметрам. Практическая значимость работы заключается в перспективе применения предложенных подходов при автоматизации металлографического анализа, контроле качества материалов и исследовании взаимосвязи «структура–свойства».

Ключевые слова: фрактальная размерность, микроструктура стали, цифровая металлография, дифференциальный метод подсчёта ячеек, количественный анализ изображений, материаловедение, физика металлов

Статья подготовлена в рамках реализации гранта №25-19-00534 от 29.05.2025 г.

© Башков А.А., Аносов М.С., Иванов С.В., Баженов Е.О., Акулова А.А., Чичеватов А.В., 2026

Для цитирования

Методы расчета фрактальной размерности по цифровому изображению микроструктуры для проведения количественной металлографии / Башков А.А., Аносов М.С., Иванов С.В., Баженов Е.О., Акулова А.А., Чичеватов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-82-92>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODS FOR CALCULATING FRACTAL DIMENSION FROM DIGITAL MICROSTRUCTURE IMAGES FOR QUANTITATIVE METALLOGRAPHY

Bashkov A.A.¹, Anosov M.S.¹, Ivanov S.V.¹, Bazhenov E.O.¹, Akulova A.A.¹, Chichevatov A.V.²

¹Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

²Y.E. Sedakov Research Institute of Measuring Systems, a branch of the Russian Federal Nuclear Center, All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In modern quantitative metallography, the development of objective methods for assessing the complexity and morphology of the microstructure of metallic materials based on digital image analysis is an important task. Traditional methods of visual analysis largely depend on the subjective interpretation of the researcher, which limits the reproducibility of the results. In this regard, the application of fractal analysis methods is a promising approach, as they make it possible to describe the geometric complexity of microstructural elements using quantitative parameters. The aim of this study is to investigate the potential of fractal dimension for the quantitative characterization of the microstructure of various steel grades using digital micrographs. The materials investigated are steels 20Kh13, U10A, 50, and 12Kh18N10T. Image processing and fractal dimension calculations have been performed using fractal analysis methods, including the differential box-counting method implemented in the developed software (Computer Program Registration Certificate No. RU 2024660065), as well as the classical box-counting algorithm implemented in MATLAB R2021b. The scientific novelty of the study lies in the comparative application of different algorithms for calculating fractal dimension to digital images of steel microstructures and in the interpretation of the obtained values from the perspective of the physics of metals. It has been shown that the fractal dimension values reflect the morphological features of microstructural elements, including grain boundaries, carbide precipitates, and martensitic structures. The results demonstrate the feasibility of using fractal analysis to move from qualitative descriptions of microstructure to quantitative parameters. The practical significance of the study lies in the potential application of the proposed approaches to the automation of metallographic analysis, quality control of materials, and investigation of structure-property relationships.

Keywords: fractal dimension, steel microstructure, digital metallography, differential box-counting method, quantitative image analysis, metals science, physics of metals.

The article was prepared within the framework of Grant No. 25-19-00534 dated May 29, 2025.

For citation

Bashkov A.A., Anosov M.S., Ivanov S.V., Bazhenov E.O., Akulova A.A., Chichevatov A.V. Methods for Calculating Fractal Dimension from Digital Microstructure Images for Quantitative Metallography. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-82-92>

Введение

Исторически металлография развивалась как дисциплина, сочетающая качественные и количественные методы анализа микроструктуры, включая стереометрические подходы и стандартизованные методы оценки, регламентированные ГОСТ, ISO, DIN, ASTM и др. В современном материаловедении, где требуется точное предсказание свойств материала, оптимизация технологических процессов и автоматизация контроля качества, возникает насущная потребность в переходе к полностью количественным методам анализа. Эта потребность обусловлена тем, что именно сложная геометрия и пространственное распределение микроструктурных элементов, таких как границы зерен, фазовые границы, поры, трещины и частицы выделений, в решающей степени определяют механические свойства материала, включая прочность, твердость, пластичность, ударную вязкость и коррозионную стойкость [1, 2]. Традиционные подходы, основанные на визуальном анализе с помощью микроскопии, позволяют классифициро-

вать структуры по морфологии фаз (например, зернистая, пластинчатая, игольчатая) и характеру их распределения [3, 4]. Однако такой подход, несмотря на свою ценность, имеет существенные ограничения. Он часто является субъективным, зависящим от опыта и квалификации исследователя, и не позволяет получить объективный, численный параметр для сравнительного анализа.

В этом контексте теория фракталов предлагает мощный инструмент для решения задачи количественной оценки сложных, нерегулярных и самоподобных структур, которые являются характерными чертами многих материалов, в том числе и металлов. В отличие от евклидовой геометрии, описывающей идеализированные формы, фрактальная геометрия способна характеризовать реальные объекты с любой степенью сложности. Центральным понятием здесь является фрактальная размерность D_f , характеризующая степень заполнения объектом пространства и определяемая скоростью роста числа элементов покрытия объекта, при уменьшении масштаба наблюдения. Важно отметить, что фрактальная размерность

не обязательно является целым числом; значение между N и $N+1$ размерностями указывает на то, что объект обладает сложностью, превышающей обычную геометрическую фигуру в N измерениях. Например, фрактальная размерность линии может быть больше 1, если она извивается и заполняет часть плоскости, и меньше 2, если она не покрывает всю плоскость. Именно эта возможность измерить сложность геометрии делает Df чрезвычайно ценным параметром для материаловедения.

Применение фрактального анализа в материаловедении и металлографии носит системный характер и направлено на преодоление ключевых проблем традиционных методов. Во-первых, это автоматизация и стандартизация анализа. Вместо ручной оценки можно разработать программные комплексы, которые за секунды рассчитывают Df для десятков или сотен изображений, обеспечивая полную объективность и воспроизводимость результатов [5]. Это особенно важно при контроле качества в промышленных условиях. Во-вторых, фрактальный анализ позволяет установить количественные связи между микроструктурой и макроскопическими свойствами, формируя более точные модели «структура-свойства». Исследования показывают, что существует сильная корреляция между фрактальной размерностью и такими параметрами, как твердость, предел текучести и усталостная прочность [2, 6, 7]. Например, было установлено, что увеличение Df микроструктуры может быть связано с ростом прочности из-за большей площади фазовых границ, которые препятствуют движению дислокаций. В-третьих, метод открывает возможности для создания автоматизированных систем классификации микроструктур. Путем обучения машинных моделей на наборах изображений с известными значениями Df и соответствующими им свойствами можно создавать системы, способные самостоятельно определять принадлежность нового образца к тому или иному классу (например, по степени термообработки или качеству сварного шва) [4, 8].

Практическое применение фрактального анализа охватывает широкий спектр задач в материаловедении. Одним из наиболее распространенных направлений является количественная фрактография – анализ поверхностей разрушения. Геометрия трещины и поверхности излома часто имеет фрактальные свойства, и их фрактальная размерность напрямую связана с механизмом хрупкого разрушения и энергией трещиностойкости [9, 10]. Другое важное направление – анализ пористости и распределения пор в материалах, где Df используется для количественной характеристики структуры пор [11, 12]. В области коррозии фрактальный анализ применяется для оценки сложности поверхности и распределения границ зерен, поскольку именно они являются предпочтительными путями для развития межкристаллитной коррозии [13, 14]. Было показано, что увеличение доли высокоугловых границ зерен и двойников может быть связано со снижением общей фрактальной размерности поверхности [14].

Для рассматриваемых в данном исследовании марок сталей фрактальный анализ может дать уникальные и глубокие сведения об их микроструктуре, которые труднодостижимы другими методами. Сталь У10А является углеродистой инструментальной сталью и ее основная структурная составляющая в равновесном состоянии – пластинчатый перлит (смесь феррита и цементита) с вторичным цементитом в виде тонкой сетки. Морфология и распределение вторичного цементита имеет решающее значение для износостойкости и прочности стали. Часто карбиды образуют сетку по границам зерен, которая является таким концентратором напряжений и очагом зарождения трещин. Фрактальная размерность этой карбидной сети может служить объективным индексом ее развития и «замкнутости», который коррелирует с усталостной прочностью [15]. Для конструкционной углеродистой стали 50 ключевыми факторами являются форма и распределение ферритных зерен и пластин перлита. Фрактальная размерность границ ферритных зерен может характеризовать степень их извилистости, которая влияет на работу упрочнения материала при пластической деформации [16, 17].

Для нержавеющей стали, таких как 20Х13 и 12Х18Н10Т, особое внимание уделяется границам зерен и их роли в формировании коррозионной стойкости. Аустенитная сталь 12Х18Н10Т, благодаря своему составу, обладает хорошей стойкостью, однако наличие крупных зерен или неоднородное распределение легирующих элементов может привести к локализованной коррозии. Фрактальный анализ границ зерен позволяет количественно оценить эту неоднородность [13, 14]. Таким образом, данное исследование направлено на демонстрацию практической применимости фрактальной размерности для количественной оценки и сравнительного анализа микроструктур четырех различных сталей, каждая из которых представляет интерес с точки зрения материаловедения.

Материалы и методы исследования

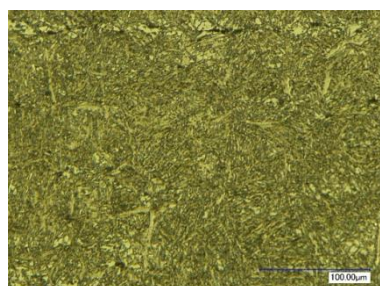
В качестве исходных материалов были выбраны металлы с различным содержанием углерода и легирующих элементов, представляющих различные классы по назначению и имеющих различную структуру. Химический состав сталей приведен в табл. 1, исходная микроструктура представлена на рис. 1.

Эффективность фрактального анализа микроструктур напрямую зависит от выбора адекватного алгоритма для расчёта фрактальной размерности и качества его реализации. В настоящей работе применяются два взаимодополняющих подхода: дифференциальный метод подсчёта ячеек (реализованный в авторском программном обеспечении) и классический метод подсчёта клеток (box-counting), реализованный в среде MATLAB. Такой подход позволяет не только повысить достоверность получаемых результатов за счёт кросс-валидации, но и продемонстрировать различия в чувствительности методов к типу изображения.

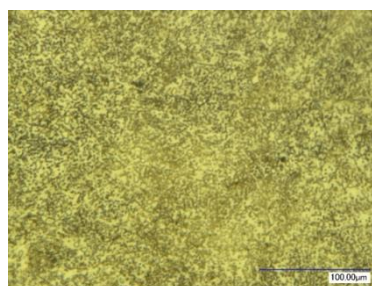
Таблица 1. Химический состав исследуемых материалов
Table 1. Chemical composition of the materials investigated

Материал	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Ti
20X13	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	до 0,3	до 0,04	до 0,035	12–14	до 0,3	до 0,08	–
У10А	0,95–1,09	0,17–0,33	0,17–0,28	до 0,25	до 0,018	до 0,025	до 0,2	до 0,25	–	–
50	0,47–0,55	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	до 0,08	–
12X18Н10Т	до 0,12	до 0,8	до 2	9–11	до 0,02	до 0,035	17–19	до 0,3	–	0,4–1

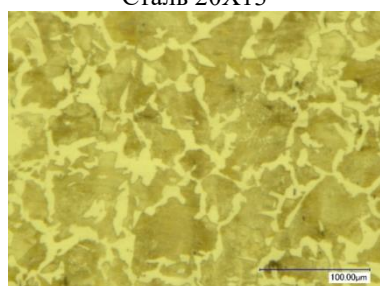
Примечание: 1. Сталь 20X13 (коррозионно-стойкая сталь мартенситного класса): исходное состояние – закалка (1000°C, охлаждение в масле), тип структуры – мартенситная.
2. Сталь У10А (инструментальная углеродистая): исходное состояние – отжиг (750–760°C, охлаждение с печью), тип структуры – мелкопластинчатый перлит с участками вторичного цементита.
3. Сталь 50 (конструкционная среднеуглеродистая): исходное состояние – нормализация (850°C, охлаждение на воздухе), тип структуры – ферритно-перлитная.
4. Сталь 12X18Н10Т (коррозионно-стойкая аустенитная сталь): исходное состояние – горячая деформация с последующим стабилизирующим отжигом при 1050–1100°C, тип структуры – аустенитная.



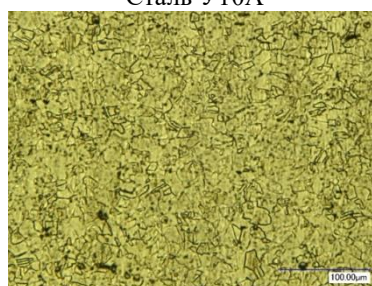
Сталь 20X13



Сталь У10А



Сталь 50



Сталь 12X18Н10Т

Рис. 1. Исходные микроструктуры исследуемых материалов (×1000)
Fig. 1. Initial microstructures of the materials investigated (×1000)

Дифференциальный метод подсчёта ячеек (авторское ПО). Программа разработана на языке Python с использованием библиотек OpenCV, NumPy и Tkinter и реализует дифференциальный метод подсчёта ячеек (box-counting) с адаптивной предобработкой изображений. Программа предоставляет пользователю графический интерфейс для загрузки цифрового изображения микроструктуры, настройки параметров анализа и визуализации результатов. Ключевые функциональные блоки:

- Загрузка изображения: поддержка форматов JPEG, PNG через диалоговое окно.
- Предварительная обработка:
 - преобразование в цветовое пространство LAB с последующим применением CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) для улучшения контрастности;
 - применение *unsharp masking* для повышения чёткости границ фаз;

– бинаризация методом *Otsu* или вручную задаваемым порогом.

– Сегментация: выделение контуров методом *cv.findContours* с фильтрацией по площади (исключаются объекты < 80 пикселей).

– Расчёт фрактальной размерности *Df*: реализован на основе алгоритма, предложенного в [18], с модификацией для работы с бинарными изображениями.

Алгоритм расчёта фрактальной размерности *Df*. Функция *fractal_dimension(Z, threshold=0.9)* выполняет следующие шаги:

1. Бинаризация: входное изображение *Z* преобразуется в бинарное:

$$Z_{bin} = (Z < \text{threshold}). \quad (1)$$

2. Определение масштабов: максимальный размер ячейки ограничивается минимальной стороной изображения $p = \min(\text{shape}(Z))$. Набор масштабов формируется как степени двойки:

$$Sizes=2^n, 2^{n-1}, \dots, 4. \quad (2)$$

3. Подсчёт ячеек: для каждого масштаба k изображение делится на непересекающиеся блоки размером $k \times k$. Подсчитывается количество блоков, содержащих хотя бы один чёрный пиксель, но не полностью заполненных (условие $(S > 0) \& (S < k \times k)$), что повышает устойчивость к шуму и сплошным областям.

4. Линейная регрессия: по точкам $(\log(sizes), \log(counts))$ строится линия методом наименьших квадратов. Фрактальная размерность определяется как

$$Df = -slope. \quad (3)$$

Этот подход отличается от классического box-counting тем, что исключает полностью белые и полностью чёрные ячейки, что особенно важно при анализе металлографических изображений с неоднородным фоном и локальными артефактами.

Классический метод подсчёта клеток в MATLAB. Для независимой верификации результатов был применён классический метод подсчёта клеток (box-counting method), реализованный в среде MATLAB R2021b (рис. 2). Данный метод является наиболее распространённым и теоретически обоснованным подходом для оценки фрактальной размерности двумерных объектов. Его суть заключается в покрытии бинарного изображения сеткой квадратных ячеек переменного размера r и подсчёте количества ячеек $N(r)$, содержащих хотя бы один чёрный пиксель (то есть принадлежащий анализируемому объекту).

Фрактальная размерность Df определяется как показатель степени в асимптотическом соотношении:

$$N(r) \propto r^{-Df}. \quad (4)$$

После логарифмирования это выражение принимает линейный вид:

$$\log(N(r)) = -Df \cdot \log(r) + C, \quad (5)$$

где C — константа.

Таким образом, фрактальная размерность Df вычисляется как угловое значение (наклон) линии линейной регрессии, аппроксимирующей зависимость $\log(N(r))$ от $\log(1/r)$ методом наименьших квадратов.

Алгоритм, реализованный в MATLAB, включает следующие этапы:

1. Загрузка исходного изображения и его преобразование в градации серого (*rgb2gray*).

2. Приведение изображения к стандартному размеру 1024×1024 пикселей (*imresize*) для обеспечения сопоставимости.

3. Бинаризация изображения (*imbinarize*) с автоматическим выбором порога.

4. Итеративное покрытие изображения сетками с размером ячейки $r = 2^i$, где $i=1,2,\dots,10$.

5. Подсчёт количества ячеек $N(r)$, содержащих чёрные пиксели.

6. Построение зависимости $\log(N(r))$ от $\log(1/r)$ и вычисление наклона линии регрессии с помощью функции *polyfit*.

```
clear all
close all
clc
img=imread('download.jpg');
figure
imshow(img)
img=rgb2gray(img);
img=imresize(img,[1024,1024]);
figure
imshow(img)
img=imbinarize(img);
figure
imshow(img)
magn_fac=zeros(9,1);
count=zeros(9,1);
[width,height]=size(img);
fprintf('Scaling factor \t Black Pixel Count \n')
for i=1:10
    factor_s=2^i;
    boxes=factor_s^2;
    box_width=width/factor_s;
    box_height=height/factor_s;
    num_black=0;
    for b_n=0:boxes-1
        present_x=idivide(int32(b_n),int32(factor_s));
        present_y = rem(b_n,factor_s);
        start_x = present_x*box_width + 1;
        last_x = start_x + box_width-1;
        start_y = present_y*box_height+1;
        last_y = start_y+ box_height -1;
        box= img([start_x:last_x],[start_y:last_y]);
        if (min(box(:))==0)
            num_black=num_black+1;
        end
    end
    fprintf('%d \t -> \t %d \n',factor_s,num_black);
    magn_fac(i)=factor_s;
    count(i)=num_black;
end
p = polyfit(log(count),-log(magn_fac),1);
plot(p)
D = polyfit(log(magn_fac),log(count),1)
```

Рис. 2. Код в среде MATLAB

Fig. 2. MATLAB code

Сравнение данных методов представлено в табл. 2.

В табл. 2 выше систематизированы ключевые параметры и методология, использованные в данном исследовании. Строгое следование этим параметрам, а также использование специально разработанного и оптимизированного программного обеспечения позволяют получить надежные и воспроизводимые результаты, что является основой для дальнейшего анализа и интерпретации полученных данных.

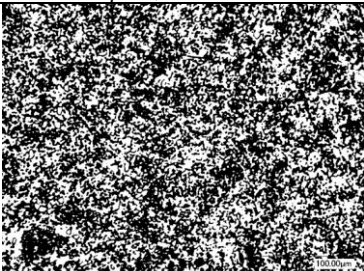
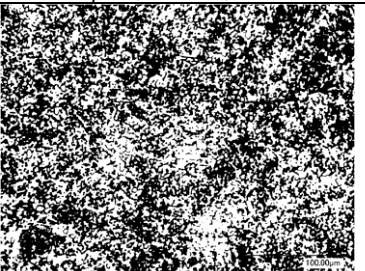
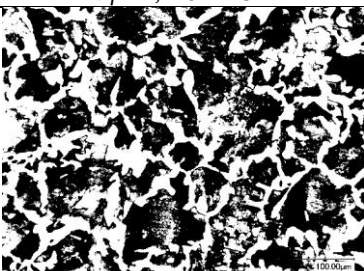
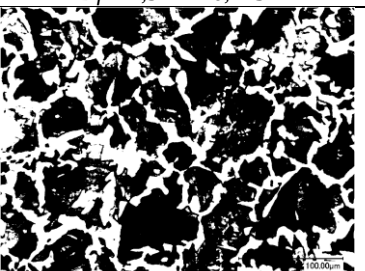
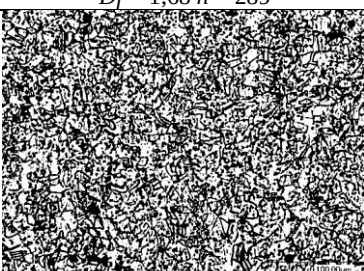
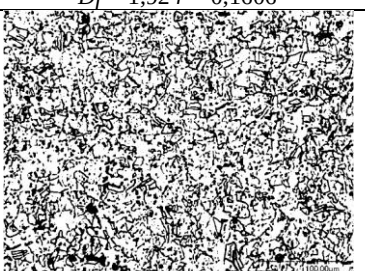
Результаты исследования и их обсуждение

Результаты фрактального анализа, представленные в табл. 3, рассчитаны для изображений исходной микроструктуры каждой из четырех марок сталей: 20X13, Y10A, 50 и 12X18H10T при увеличении $\times 1000$. Эти значения служат объективным количественным индексом сложности геометрии анализируемых объектов, будь то границы зерен, фазовые границы или распределение вторичных фаз. Для наглядности представления, помимо численных данных и исходных микроструктур, приводятся примеры изображений с наложенными сетками ячеек разного размера, что демонстрирует сам принцип работы метода подсчета ячеек.

Таблица 2. Сравнение методов расчета фрактальной размерности
 Table 2. Comparison of methods for calculating fractal dimension

Параметр	Значение	
	Дифференциальный метод (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024660065)	Классический метод (MATLAB)
Алгоритм	Дифференциальный метод подсчета ячеек (box-counting)	Классический метод подсчета клеток (box-counting) без дополнительной фильтрации
Объект анализа	Исходные микроструктуры сталей 20X13, У10А, 50, 12X18Н10Т, полученные на цифровом микроскопе Keyence VHX1000	
Предварительная обработка изображений	Повышение контрастности и четкости + бинаризация	Бинаризация
Определяемые параметры	Df , количество контуров n , средний балл зерна	Df , размер ячейки r

Таблица 3. Результаты фрактального анализа изображений микроструктур
 Table 3. Results of fractal analysis of microstructure images

Материал	Значения	
	Дифференциальный метод (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024660065)	Классический метод (MATLAB)
Сталь 20X13		
	$Df = 1,83 \quad n = 1804$	$Df = 1,94 \quad r = 0,1454$
Сталь У10А		
	$Df = 1,776 \quad n = 844$	$Df = 1,91 \quad r = 0,2131$
Сталь 50		
	$Df = 1,68 \quad n = 289$	$Df = 1,92 \quad r = 0,1606$
Сталь 12X18Н10Т		
	$Df = 1,797 \quad n = 899$	$Df = 1,835 \quad r = 0,3656$

Для хромистой нержавеющей стали 20Х13, которая имеет мартенситную структуру, был проведен анализ фрактальной размерности или морфологии мартенситных пластин. Полученные значения фрактальной размерности составили 1,83 (1,94). Эти значения являются достаточно высокими и характерны для структур с развитой внутренней текстурой. Мартенсит представляет собой совокупность игольчатых кристаллов (пластин), рост которых ограничивается взаимодействием с уже сформированными кристаллами и границами зерен, вследствие чего их взаимное пересечение в строгом смысле не реализуется. Размер мартенситных игл традиционно оценивается по балльной шкале (ГОСТ 8233-56). Фрактальная размерность в данном случае не заменяет балльную оценку мартенсита, а характеризует геометрическую сложность пространственного распределения игл и их морфологическую неоднородность. Значения D_f свидетельствуют о значительной сложности и развитости мартенситной структуры, которая характеризуется высокой плотностью дислокаций и внутренними напряжениями, что напрямую связано с высокой твердостью и прочностью данной стали.

Для углеродистой инструментальной стали У10А основной целью анализа было количественное определение сложности и непрерывности карбидной сетки, образующейся по границам аустенитных зерен в процессе полного отжига (температура нагрева выше A_{cm}). Карбидная сетка является критическим дефектом, так как она значительно снижает вязкость и износостойкость стали. Фрактальная размерность, рассчитанная для этой сетки, составляет 1,776 (1,91). Такое высокое значение D_f близко к максимально возможному для двумерного объекта (равному 2,0), что свидетельствует о чрезвычайно сложной, извилистой и плотно заполняющей пространство структуре. Это указывает на высокую степень развития и «замкнутость» сетки, что полностью соответствует визуальному анализу. Чем выше значение D_f , тем более фрагментированной и сложной является структура.

В случае конструкционной углеродистой стали 50, которая имеет ферритно-перлитную структуру, была проанализирована фрактальная размерность границ ферритных зерен. Для данной стали полученные значения составляют 1,68 (1,92). Эти значения находятся в среднем диапазоне и характеризуют ферритные зерна как элементы со сравнительно гладкими и низкой степенью извилистости границами. Такая структура типична для нормализованных конструкционных сталей, где происходит фазовая перекристаллизация и, как правило, измельчения зерна. Значение D_f говорит о том, что границы зерен не являются сильно развитыми или извилистыми, что является благоприятным фактором для повышенной пластичности материала.

Для аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, используемой в агрессивных средах, особый интерес представляет структура границ зерен, так как именно они могут являться путями для межкристаллитной коррозии. Анализ границ зерен этой стали дал значения фрактальной размерности 1,797 (1,835). Эти высокие значения D_f указывают на то, что границы зерен имеют

максимальную извилистость и не являются гладкими. Гладкие границы могут быть менее эффективными в качестве барьеров для дислокаций (что снижает прочность), для коррозионной стойкости они могут быть предпочтительнее, так как уменьшается общая площадь границ, доступных для воздействия коррозионной среды. Кроме того, фрактальный анализ может косвенно характеризовать долю различных типов границ: например, высокая доля низкоугловых границ зерен, которые очень устойчивы к коррозии, может приводить к снижению общей фрактальной размерности [14].

Таким образом, представленные результаты наглядно демонстрируют возможность использования фрактальной размерности как объективного количественного параметра для описания и сравнения сложности микроструктур различных марок сталей. Полученные численные значения позволяют перейти от качественных характеристик («сетка развита», «зерна мелкие») к точным цифровым метрикам, которые могут быть использованы для дальнейшего анализа и прогнозирования свойств.

При фрактальном анализе изображений микроструктур (см. табл. 3) учитывались «подсвеченные» перлитные участки для стали 50. Наиболее ярко они проявлялись при использовании дифференциального метода. Для исключения влияния перлитных участков с повышенной яркостью необходима дополнительная морфологическая фильтрация бинарных изображений (например, операция открытия/закрытия), а также анализ чувствительности результатов к порогу бинаризации.

Значения фрактальной размерности D_f , полученные классическим методом подсчета клеток в MATLAB, всегда были выше, чем при расчете с помощью разработанной программы для ЭВМ на 7-10%. Скорее всего, это связано с различиями в алгоритмической обработке бинарных изображений: классический метод учитывает все ячейки, содержащие хотя бы один черный пиксель, включая полностью заполненные области (например, сплошные фазы или включения, а также нечетко выявленные элементы структуры, связанные с подготовкой микрошлифа и его травления), что искусственно завышает количество «активных» ячеек на крупных масштабах и, как следствие, увеличивает наклон регрессионной зависимости $\log N(r)$ от $\log(1/r)$. В то же время реализованный в авторском ПО алгоритм применяет фильтрацию по степени заполнения ячейки, исключая из расчета как полностью белые, так и полностью черные блоки (условие $0 < S < k^2$). Такой подход повышает чувствительность метода к истинной геометрической сложности границ фаз и микрон неоднородностей, игнорируя вклад однородных областей, которые не несут информации о фрактальной природе структуры. Таким образом, более низкие значения D_f , полученные с помощью разработанного программного обеспечения, отражают более точную оценку морфологической сложности микроструктуры, свободную от влияния сплошных фаз и включений. Различия значений D_f объясняются тем, что авторский алгоритм более устойчив к локальным неоднородностям благодаря

CLANE-усилению контраста и фильтрации ячеек по степени заполнения. Это делает его особенно пригодным для анализа реальных микроструктур, полученных в промышленных условиях.

Полученные значения фрактальной размерности для микроструктур сталей 20X13, У10А, 50 и 12X18Н10Т представляют собой не просто абстрактные числа, а содержательные количественные характеристики, которые могут быть интерпретированы в тесной связи с физикой металлов и технологией обработки. Сопоставление полученных данных с известными фактами о составе, структуре и свойствах рассматриваемых сталей позволяет глубже понять природу связей между микроструктурой и макроскопическими параметрами.

Корреляция между фрактальной размерностью микроструктуры и макроскопическими механическими свойствами, такими как прочность и твердость, является одной из ключевых областей применения фрактального анализа в материаловедении [2, 19]. В одном из исследований было показано, что фрактальный анализ позволяет установить корреляцию между микроструктурой и механическими свойствами [4]. Корреляция между сложностью структуры и механическими свойствами была продемонстрирована в ряде исследований, где было показано, что параметры микроструктуры, такие как размер и расстояние между твердыми фазами, напрямую влияют на усталостную прочность [15].

Форма и распределение фаз критически влияют на пластические деформации и работу упрочнения [16, 17]. Хотя крупнозернистая структура нежелательна для большинства конструкционных сталей из-за эффекта хрупкости при понижении температуры, для некоторых аустенитных нержавеющей сталей она может быть допустима. В контексте коррозионной стойкости гладкие низкодисперсные границы зерен могут быть даже предпочтительнее, так как они уменьшают общую площадь, доступную для коррозионного воздействия, особенно в случаях межкристаллитной коррозии [13]. В статье [14] было показано, что материал с микроструктурой, состоящей из низкоугловых границ зерен и двойников, обладает более высокой стойкостью к коррозии. Таким образом, низкая фрактальная размерность может косвенно указывать на высокую долю таких благоприятных типов границ.

Необходимо также обсудить потенциальные ограничения и факторы, влияющие на точность методов. Во-первых, фрактальная размерность является масштабно-зависимой величиной. Расчет проводится в определенном диапазоне масштабов, и результат может меняться, если этот диапазон будет расширен или сужен. Необходимо выбирать диапазон, соответствующий области самоподобия анализируемого объекта. Во-вторых, результаты чувствительны к параметрам предобработки изображения, в частности к порогу бинаризации для двоичных изображений [20]. В данном исследовании были использованы различные методы с отличающимися параметрами предварительной обработки, что позволило оценить влияние этих факторов. В-третьих, следует помнить, что фрактальная размерность является лишь одной из мер сложности. Для более полного описания

неоднородных структур может потребоваться применение мультискального анализа, который предоставляет дополнительные параметры, такие как *информационная энтропия* и *корреляционная размерность* [21]. Тем не менее даже базовая фрактальная размерность, рассчитанная методом дифференциального подсчета ячеек (box-counting), уже предоставляет мощный и объективный инструмент для количественного анализа и сравнения микроструктур.

Следует отметить, что фрактальная размерность не является прямым аналогом традиционных металлографических параметров, регламентированных ГОСТ (балл зерна, балл мартенсита и др.), а представляет собой дополнительный интегральный показатель геометрической сложности. Таким образом, фрактальный анализ целесообразно рассматривать как вспомогательный инструмент, дополняющий стандартные методы количественной металлографии, прежде всего при анализе границ зерен и фазовых интерфейсов. Полученные значения D_f могут служить входными данными для машинного обучения, например для нейронных сетей, предназначенных для прогнозирования механических свойств стали по ее изображению [22]. Также D_f может использоваться как контролируемый параметр в процессе оптимизации термической обработки, позволяя достичь целевой сложности микроструктуры для получения заданных свойств. Таким образом, фрактальная размерность становится не просто описательным параметром, а управляемым фактором в цифровом материаловедении [23].

Заключение

Настоящее исследование подтвердило высокую эффективность фрактальной размерности как объективного и количественного параметра для оценки сложности микроструктур сталей. Путем применения метода дифференциального подсчета ячеек (box-counting), реализованного в специально разработанном и защищенном патентом программном обеспечении, удалось количественно охарактеризовать и сравнить микроструктурные особенности четырех различных марок сталей: 20X13, У10А, 50 и 12X18Н10Т. Полученные значения фрактальной размерности не только подтвердили визуальные представления о характере этих структур, но и предоставили им строгую численную оценку. Это позволяет перейти от субъективных, качественных описаний к объективному, воспроизводимому количественному анализу, что является ключевым требованием современного материаловедения. Таким образом, фрактальная размерность выступает в роли связки между визуально наблюдаемой морфологией структуры и механическими свойствами материала.

Научная новизна данного исследования определяется двумя основными аспектами. Во-первых, это систематическое применение фрактального анализа к конкретному и технологически важному набору сталей, каждый из которых представляет особый интерес с точки зрения их микроструктурных особенностей и обла-

сти применения. Во-вторых, использование собственного программного комплекса, защищенного авторским свидетельством РФ № RU 2024660065. Это свидетельствует о разработке оригинального, оптимизированного и методологически строгого инструмента для проведения фрактального анализа, что повышает точность и надежность получаемых результатов по сравнению с использованием стандартных коммерческих или открытых программных продуктов.

Практическая ценность полученных результатов весьма высока. Представленный подход может быть успешно интегрирован в практику контроля качества продукции в металлургической промышленности. Фрактальная размерность может служить объективным, количественным показателем соответствия микроструктуры заданным технологическим режимам термической обработки. Более того, полученные данные могут быть использованы для обучения моделей машинного обучения, которые смогут по изображению микроструктуры прогнозировать ее механические свойства, что является перспективным направлением в материаловедении. В заключение фрактальный анализ и, в частности, расчет фрактальной размерности доказывают свою состоятельность как мощный, универсальный и объективный метод для количественной оценки микроструктуры металлов, открывая новые возможности для ее изучения, контроля и управления свойствами материалов.

Список источников

- Chermant J.L., Coster M. Quantitative fractography // *J Mater Sci.* 1979, 14, 509–534. <https://doi.org/10.1007/BF00772710>.
- Macroscopic mechanical properties and microstructure characteristics of steel slag fine aggregate concrete / Gang Xue, Qian Fu, Sheng Xu, Jingjun Li // *Journal of Building Engineering.* 2022, vol. 56, 104742. ISSN 2352-7102. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104742>.
- R.P.M. Procter, 1.03 - Outline of Structural Metallurgy Relevant to Corrosion / Bob Cottis, Michael Graham, Robert Lindsay, Stuart Lyon, Tony Richardson, David Scantlebury, Howard Stott // *Shreir's Corrosion*, Elsevier, 2010, pp. 52-76. ISBN 9780444527875. <https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00201-8>.
- Automatic Recognition of SEM Microstructure and Phases of Steel using LBP and Random Decision Forest Operator / Gupta Subir, Sarkar Jit, Kundu Malay, Bandyopadhyay N., Ganguly Subhas // *Measurement.* 2020, 151, 107224. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107224>.
- Garashchenko Ya., Glushko A., Kobet O., Harashchenko O. Fractal Analysis of Structural and Phase Changes in the Metal of Welded Steam Pipe Joints. 2021. [10.1007/978-3-030-77719-7_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_4).
- Experimental comparison of mechanical properties and fractal characteristics of geothermal reservoir rocks after different cooling treatments / Yan Xi, Haoyu Wang, Jun Li, Wentao Dong, Han Li, Boyun Guo // *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 5158-5176. ISSN 2352-4847. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.207>.
- Krajewski Slawomir, Nowacki J. Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques // *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2014, vol. 14, pp. 278-286. DOI: 10.1016/j.acme.2013.10.002.
- An automated morphological classification of ferrite-martensite dual-phase microstructures / Tanusree Dutta, Debdulal Das, Siddhartha Banerjee, Sanjoy Kumar Saha, Shubhabrata Datta // *Measurement.* 2019, vol. 137, pp. 595-603. ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.106>.
- Automatic estimation of mechanical properties from fractographs using optimal anisotropic diffusion and Voronoi tessellation / Samik Dutta, Abhishek Karmakar, Himadri Roy, Kaustav Barat // *Measurement.* 2019, vol. 134, pp. 574-585. ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.100>.
- Swastik Soni, Abhishek Tiwari, R.N. Singh. Quantitative fractography in the DBT regime of 9Cr-1Mo ferritic/martensitic steel // *Procedia Structural Integrity.* 2025, vol. 68, pp. 513-519. ISSN 2452-3216. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.090>.
- Fractal analysis and its impact factors on pore structure of artificial cores based on the images obtained using magnetic resonance imaging / Heming Wang, Yu Liu, Yongchen Song, Yuechao Zhao, Jiafei Zhao, Dayong Wang // *Journal of Applied Geophysics.* 2012, vol. 86, pp. 70-81. ISSN 0926-9851. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.07.015>.
- Fractal Characteristics and Significance of Different Pore Types of the Wufeng–Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin, China, Based on N2 Adsorption and Image Analysis / Yang Chen, Hongming Tang, Majia Zheng, Changsheng Li, Shengxian Zhao, Ning Zhao, and Yijiang Leng // *ACS Omega.* 2021, 6 (46), 30889-30900. DOI: 10.1021/acsomega.1c02539.
- Grain boundary design based on fractal theory to improve intergranular corrosion resistance of TWIP steels / Hao Fu, Wei Wang, Xiaojun Chen, Giorgio Pia, Jinxi Li // *Materials & Design.* 2020, vol. 185, 108253. ISSN 0264-1275. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108253>.
- Effect of grain size and grain boundary type on intergranular stress corrosion cracking of austenitic stainless steel: A phase-field study / Qionghuan Zeng, Yiming Chen, Zhongsheng Yang, Lei Zhang, Zhijun Wang, Lei Wang, Junjie Li, Jincheng Wang // *Corrosion Science.* 2024, vol. 241, 112557. ISSN 0010-938X. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112557>.
- Influence of hard phase size and spacing on the fatigue crack propagation in tool steels - Numerical simulation and experimental validation / Brackmann L, Wingender D, Weber S, Balzani D, Röttger A. // *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* 2023, vol. 46, no. 10, pp. 3872-3891. DOI: 10.1111/ffe.14107.
- Statistical and theoretical analysis of precipitates in dual-phase steels microalloyed with titanium and their effect on mechanical properties / R. Soto, W. Saikaly, X. Bano, C. Issartel, G. Rigaut, A. Charai // *Acta Materialia.* 1999, vol. 47, is. 12, pp. 3475-3481. ISSN 1359-6454. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00190-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00190-1).
- In Situ EBSD Observation and Numerical Simulation of Microstructure Evolution and Strain Localization of DP780 Dual-Phase Steel / Ren Y., Li S., Feng S., Li Y.,

- Yuan C. // Materials. 2025, 18, 426. <https://doi.org/10.3390/ma18020426>
 18. Grassberger P. On efficient box counting algorithms // International Journal of Modern Physics. 1993, vol. 4, no. 3, pp. 515–523.
 19. Hilders O.A., Zambrano N., Caballero R. Microstructure, Strength, and Fracture Topography Relations in AISI 316L Stainless Steel, as Seen through a Fractal Approach and the Hall-Petch Law // International Journal of Metals. 2015, 624653, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2015/624653>
 20. Dependence of multifractal analysis parameters on the darkness of a processed image /Merike Martsepp, Tõnu Laas, Katrin Laas, Jaanis Priimets, Siim Tõkke, Valdek Mikli // Chaos, Solitons & Fractals, 2022, vol. 156, 111811. ISSN 0960-0779. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111811>.
 21. Чумак О.В. Энтропии и фракталы в анализе данных. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. 164 с.
 22. Predictive Modeling of Hardness Values and Phase Fraction Percentages in Micro-Alloyed Steel during Heat Treatment Using AI / Bassi A., Bodas S.T., Hasan S.S., Sidhu G., Srinivasan S. // Metals. 2024, 14, 49. <https://doi.org/10.3390/met14010049>
 23. Кабалдин Ю.Г. Цифровое материаловедение. Прогнозирование структуры и механических свойств новых материалов // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104, № 4. С. 344-349. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-4-344-349. EDN TPBBKV.
- ### References
1. Chermant J.L., Coster M. Quantitative fractography. J Mater Sci. 1979;14:509-534. DOI: 10.1007/BF00772710.
 2. Xue G., Fu Q., Xu S., Li J. Macroscopic mechanical properties and microstructure characteristics of steel slag fine aggregate concrete. Journal of Building Engineering. 2022;56:104742. DOI: 10.1016/j.job.2022.104742.
 3. Procter R.P.M, Bob Cottis, Michael Graham, Robert Lindsay, Stuart Lyon, Tony Richardson, David Scantlebury, Howard Stott. Outline of structural metallurgy relevant to corrosion. Shreir's Corrosion. Elsevier, 2010, pp. 52-76. DOI: 10.1016/B978-044452787-5.00201-8.
 4. Gupta S., Sarkar J., Kundu M., Bandyopadhyay N., Ganguly S. Automatic recognition of SEM microstructure and phases of steel using LBP and random decision forest operator. Measurement. 2020;151:107224. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107224.
 5. Garashchenko Ya., Glushko A., Kobet O., Harashchenko O. Fractal analysis of structural and phase changes in the metal of welded steam pipe joints. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77719-7_4.
 6. Xi Y., Wang H., Li J., Dong W., Li H., Guo B. Experimental comparison of mechanical properties and fractal characteristics of geothermal reservoir rocks after different cooling treatments. Energy Reports. 2022;8:5158-5176. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.207.
 7. Krajewski S., Nowacki J. Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014;14:278-286. DOI: 10.1016/j.acme.2013.10.002.
 8. Dutta T., Das D., Banerjee S., Saha S.K., Datta S. An automated morphological classification of ferrite-martensite dual-phase microstructures. Measurement. 2019;137:595-603. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.106.
 9. Dutta S., Karmakar A., Roy H., Barat K. Automatic estimation of mechanical properties from fractographs using optimal anisotropic diffusion and Voronoi tessellation. Measurement. 2019;134:574-585. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.10.100.
 10. Soni S., Tiwari A., Singh R.N. Quantitative fractography in the DBT regime of 9Cr-1Mo ferritic/martensitic steel. Procedia Structural Integrity. 2025;68:513-519. DOI: 10.1016/j.prostr.2025.06.090.
 11. Wang H., Liu Y., Song Y., Zhao Y., Zhao J., Wang D. Fractal analysis and its impact factors on pore structure of artificial cores based on the images obtained using magnetic resonance imaging. Journal of Applied Geophysics. 2012;86:70-81. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2012.07.015.
 12. Chen Y., Tang H., Zheng M., Li C., Zhao S., Zhao N., Leng Y. Fractal characteristics and significance of different pore types of the Wufeng-Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin, China, based on N2 adsorption and image analysis. ACS Omega. 2021;6(46):30889-30900. DOI: 10.1021/acsomega.1c02539.
 13. Fu H., Wang W., Chen X., Pia G., Li J. Grain boundary design based on fractal theory to improve intergranular corrosion resistance of TWIP steels. Materials & Design. 2020;185:108253. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108253.
 14. Zeng Q., Chen Y., Yang Z., Zhang L., Wang Z., Wang L., Li J., Wang J. Effect of grain size and grain boundary type on intergranular stress corrosion cracking of austenitic stainless steel: A phase-field study. Corrosion Science. 2024;241:112557. DOI: 10.1016/j.corsci.2024.112557.
 15. Brackmann L., Wingender D., Weber S., Balzani D., Röttger A. Influence of hard phase size and spacing on the fatigue crack propagation in tool steels - Numerical simulation and experimental validation. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2023;46(10):3872-3891. DOI: 10.1111/ffe.14107.
 16. Soto R., Saikaly W., Bano X., Issartel C., Rigaut G., Charai A. Statistical and theoretical analysis of precipitates in dual-phase steels microalloyed with titanium and their effect on mechanical properties. Acta Materialia. 1999;47(12):3475-3481. DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00190-1.
 17. Ren Y., Li S., Feng S., Li Y., Yuan C. In situ EBSD observation and numerical simulation of microstructure evolution and strain localization of DP780 dual-phase steel. Materials. 2025;18:426. DOI: 10.3390/ma18020426.
 18. Grassberger P. On efficient box counting algorithms. International Journal of Modern Physics. 1993;4(3):515-523.
 19. Hilders O.A., Zambrano N., Caballero R. Microstructure, strength, and fracture topography relations in AISI 316L stainless steel, as seen through a fractal approach and the Hall-Petch law. International Journal of Metals. 2015;624653:10. DOI: 10.1155/2015/624653.
 20. Martsepp M., Laas T., Laas K., Priimets J., Tõkke S., Mikli V. Dependence of multifractal analysis parameters on the darkness of a processed image. Chaos, Solitons & Fractals. 2022;156:111811. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.111811.
 21. Chumak O.V. *Энтропии и фракталы в анализе данных* [Entropies and fractals in data analysis]. Moscow; Izhevsk: SRC Regular and Chaotic Dynamics, Institute of Computer Research Publishing House, 2011, 164 p. (In Russ.)

22. Bassi A., Bodas S.T., Hasan S.S., Sidhu G., Srinivasan S. Predictive modeling of hardness values and phase fraction percentages in micro-alloyed steel during heat treatment using AI. *Metals*. 2024;14:49. DOI: 10.3390/met14010049.
23. Kabaldin Yu.G. Digital materials science. Prediction of the structure and mechanical properties of new materials. *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik of mechanical engineering]. 2025;104(4):344-349. (In Russ.) DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-4-344-349. EDN TPBBKV.

Поступила 30.01.2026; принята к публикации 23.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 30/01/2026; revised 23/03/2026; published 30/09/2026

Башков Андрей Алексеевич – старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: bashkov.aa@nntu.ru. ORCID: 0000-0002-6658-0197.

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID: 0000-0001-8150-9332.

Иванов Сергей Владимирович – инженер ИОЦ ИПТМ,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ivanov.serega.2016@mail.ru. ORCID: 0009-0009-5614-4656.

Баженов Евгений Олегович – старший преподаватель кафедры «Машиностроительные технологические комплексы»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: bazhenov98evgenii@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0193-6065.

Акулова Анна Александровна – инженер ИПТМ,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: akulova.anna98@mail.ru. ORCID: 0009-0002-6553-3433.

Чичеватов Алексей Васильевич – инженер-исследователь,
филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород, Россия.
Email: avchichevatov@mail.ru.

Andrey A. Bashkov – Senior Lecturer at the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: bashkov.aa@nntu.ru. ORCID 0000-0002-6658-0197.

Maxim S. Anosov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332.

Sergey V. Ivanov – Engineer at the Information and Educational Center of the Institute of Industrial Engineering Technologies,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: ivanov.serega.2016@mail.ru. ORCID: 0009-0009-5614-4656

Evgeny O. Bazhenov – Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering Technological Complexes,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: bazhenov98evgenii@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0193-6065.

Anna A. Akulova – Engineer of the Institute of Industrial Engineering Technologies,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: akulova.anna98@mail.ru. ORCID: 0009-0002-6553-3433.

Alexey V. Chichevatov – Research Engineer,
Y.E. Sedakov Research Institute of Measuring Systems, a branch of the Russian Federal Nuclear Center,
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: avchichevatov@mail.ru.