

УДК 669.112.227.32:519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261218.31.444

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ОЦЕНКЕ ПЕРЛИТНОЙ СТРУКТУРЫ

ВОЛЧУК В. Н., *д-р техн. наук, проф.*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

Аннотация. Введение. Сталь с перлитной структурой характеризуется хорошими пластическими свойствами в сочетании с прочностными, поэтому имеют широкий спектр применения. Благодаря невысокому содержанию легирующих элементов они являются перспективным материалом для использования в различных отраслях промышленности и с экономической точки зрения. Для анализа структуры пластинчатого перлита различной дисперсности предлагается применить мультифрактальный анализ, который используют для описания неоднородных объектов. **Материалы и методика.** Исследовалась балловая шкала от 1 до 10 для пластинчатого перлита согласно ГОСТ 8233 путем вычисления спектра статистических размерностей. **Результаты эксперимента.** Численные значения размерностей составляющих пластинчатого перлита – цементита D_{100} и феррита D_{100} уменьшались при возрастании межпластинчатого расстояния от 0,2 мкм (балл 1) до 2 мкм и более (балл 10). **Выводы.** Размерностные оценки пластинчатого перлита различной дисперсности можно использовать наряду с его балловой оценкой при прогнозе качества металла на основании анализа его структуры.

Ключевые слова: структура; перлит; мультифрактал; размерность; балловая шкала; сталь

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ПЕРЛІТНОЇ СТРУКТУРИ

ВОЛЧУК В. М., *д-р техн. наук, проф.*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

Анотация. Вступ. Сталь з перлітною структурою характеризуються хорошими пластичними властивостями в поєднанні з характеристиками міцності, тому мають широкий спектр застосування. Завдяки невисокому вмісту легуючих елементів вони являють собою перспективний матеріал для використання в різних галузях промисловості і з економічної точки зору. Для аналізу структури пластинчастого перліту різної дисперсності пропонується застосувати мультифрактальний аналіз, який використовують для опису неоднорідних об'єктів. **Матеріали та методика.** Досліджувалася бальна шкала від 1 до 10 для пластинчастого перліту згідно з ГОСТ 8233 шляхом обчислення спектра статистичних розмірностей. **Результати експерименту.** Чисельні значення розмірностей складових пластинчастого перліту – цементиту D_{100} та фериту D_{100} зменшувалися при зростанні міжпластинчастої відстані від 0,2 мкм (бал 1) до 2 мкм і більше (бал 10). **Висновки.** Оцінки розмірностей пластинчастого перліту різної дисперсності можна використовувати поряд з його баловою оцінкою для прогнозу якості металу на підставі аналізу його структури.

Ключові слова: структура; перліт; мультифрактал; розмірність; бальна шкала; сталь

MULTIFRACTAL APPROACH WHEN ESTIMATING A PEARLITE STRUCTURE

VOLCHUK V. N., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment “Pridniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernishevskogo str., 24-a, Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

Abstract. Introduction. Steel with pearlitic structure is characterized by good plastic properties in combination with strength, therefore, have a wide range of applications. Due to the low content of alloying elements, they are a promising material for use in various industries and from an economic point of view. To analyze the structure of plate-like perlite of various dispersity, it is proposed to apply a multifractal analysis, which is used to describe inhomogeneous objects. **Materials and methods.** The scoring scale from 1 to 10 for the plate perlite according to GOST 8233 was investigated by calculating the spectrum of statistical dimensions. **Results of the experiment.** The numerical values of the dimensions of the components of lamellar perlite and cementite D_{100} and ferrite D_{100} decreased with increasing interplate distance from 0,2 μm (point 1) to 2 μm or more (point 10). **Conclusions.** Dimensional estimates of

lamellar perlite of various dispersity can be used along with its scoring when predicting the quality of a metal based on an analysis of its structure.

Keywords: *structure; perlite; multifractal; dimension; point scale; steel*

Введение. Разработанная Б. Мандельбротом фрактальная геометрия [1] используется для идентификации сложных объектов различной природы (см., к примеру, [2-5]).

Язык фрактальной геометрии нашел широкое применение также при оценке структуры и качества металлов [6–9 и др.]. Его применение обусловлено неполнотой формальной аксиоматики, возникающей при идентификации структуры различных масштабных уровней, что отражается на результатах прогноза критериев качества металла на основании анализа элементов его структуры [10; 11]. Для частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики используется фрактальный подход [12].

В строительстве часто используют стали со структурой пластинчатого перлита, обеспечивающего необходимый комплекс механических свойств. Подобные структуры, в основном, оцениваются балловой

шкалой, что вносит определенную погрешность при прогнозе показателей качества сталей перлитного класса.

В работе предлагается для исследования структуры пластинчатого перлита различной дисперсности применять мультифрактальный подход, базирующийся на размерностных оценках его составляющих (феррита и цементита). Применение такого подхода обусловлено неоднородностью структуры пластинчатого перлита, что характерно для неоднородных фракталов (мультифракталов) [13; 14].

Материалы и методики. Исследовалась перлитная структура сталей с применением мультифрактального анализа. С этой целью рассматривалась балловая шкала № 1 пластинчатого перлита согласно ГОСТ 8233 «Сталь. Эталоны микроструктуры».

В зависимости от межпластинчатого расстояния между пластинами феррита и цементита структура пластинчатого перлита подразделяется на 10 баллов, согласно приведенной ниже таблице и рисунку 1.



Рис. 1. Эталонная шкала 1, используемая для определения дисперсности пластинчатого перлита

Градація пластинчатого перлита

Балл	Характеристика перлита	Межпластинчатое расстояние, мк
1	Сорбитообразный	Менее 0,20
2	Скрытопластинчатый	0,30
3	Тонкопластинчатый	0,40
4	Мелкопластинчатый	0,60
5	Мелкопластинчатый	0,80
6	Среднепластинчатый	1,00
7	Среднепластинчатый	1,20
8	Крупнопластинчатый	1,60
9	Крупнопластинчатый	2,00
10	Грубопластинчатый	Более 2,00

Примечание. Межпластинчатое расстояние определяется в зернах перлита наибольшей дисперсности, где пластинки цементита расположены перпендикулярно к плоскости шлифа.

При мультифрактальном анализе спектр размерностей $D(q)$ может изменяться в зависимости от величины показателя степени q , который может принимать значения на интервале от $-\infty$ до $+\infty$, и естественно, что в этом интервале могут находиться элементы спектра любого генерирующего его объекта согласно формуле Реньи [15].

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta},$$

где δ - ячейка, являющаяся единичным элементом квадратной сетки, которой покрывают исследуемый объект для вычисления его размерности [14],

p_i - представляет собой вероятность попадания точки, находящейся на исследуемом объекте, в i -ю ячейку квадратной сетки с размером δ ,

$$\sum_{i=1}^N p_i^q - \text{обобщенная статистическая}$$

сумма, характеризуемая показателем степени q , который может принимать любые значения в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$.

Обозначив через $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$ фрактальные размерности, характеризующие соответственно: D_0 - однородный фрактал при $q = 0$

(размерность Хаусдорфа–Безиковича); D_1 - информационную размерность при $q = 1$ (информационную энтропию) характеризующую скорость роста количества информации и показывающую, как возрастает информация, необходимая для определения местоположения точки, находящейся на объекте исследования, при стремлении размера ячейки δ к нулю; D_2 - корреляционную размерность, при $q = 2$ характеризующую вероятность нахождения в одной и той же ячейке сетки двух точек, находящихся на объекте наблюдения; D_∞ - размерность, характеризующую наиболее разреженное пространство в объекте наблюдения; $D_{-\infty}$ - размерность, характеризующую наиболее концентрированное пространство, наблюдаемое в этом объекте.

Результаты эксперимента. Статистические размерности пластинчатого перлита в диапазоне от D_{-100} до D_{100} рассчитывались по приведенной выше формуле (рис. 2). Как показали результаты расчетов, численные значения размерностей D_{-100} и D_{100} уменьшались при возрастании межпластинчатого расстояния от 0,2 мкм (балл 1) до 2 мкм и более (балл 10). В данном случае размерности D_{-100} соответствуют темные элементы структуры (цементит), а размерности D_{100} - светлые элементы структуры (феррит).

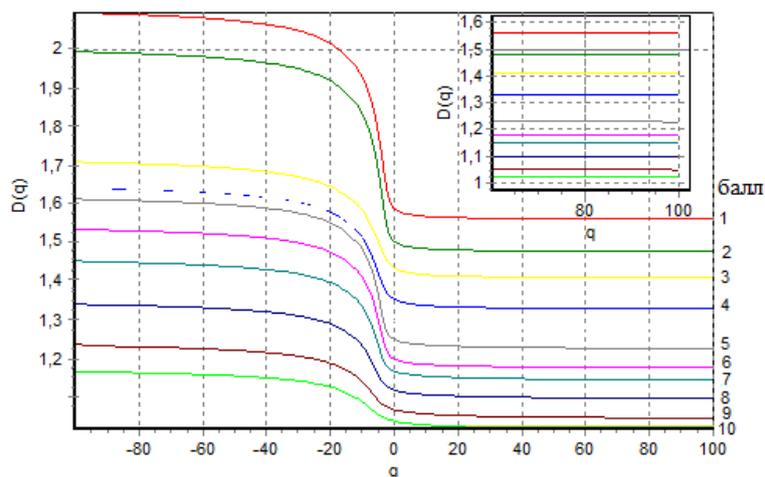


Рис. 2. Спектр обобщенных размерностей пластинчатого перлита

Гистограмма, приведенная на рисунке 3, описывает влияние дисперсности пластинчатого перлита на размерностные оценки пластин цементита и феррита.

Установленные на рисунке 3 соотношения между размерностями пластинчатого перлита и величиной балла n описываются уравнениями регрессии (1) и (2):

$$1) \text{ для цементита} \\ D_{-100} = -0,0607n + 1,5847, \quad (1) \\ R^2 = 0,97.$$

$$2) \text{ для феррита} \\ D_{100} = -0,0976n + 2,116, \quad (2) \\ R^2 = 0,95.$$

Показатели размерности пластинчатого перлита D_{-100} до D_{100} повышаются с возрастанием его дисперсности. С геометрической точки зрения, когда пластины цементита и феррита начинают разрешаться под микроскопом при заданном увеличении 1 000, их становится меньше на исследуемой единице площади, а значит, они вносят меньший вклад в значения размерностей феррита и цементита соответственно. Это влияет на уменьшение численных показателей размерностей феррита и перлита при возрастании их межпластинчатого расстояния.

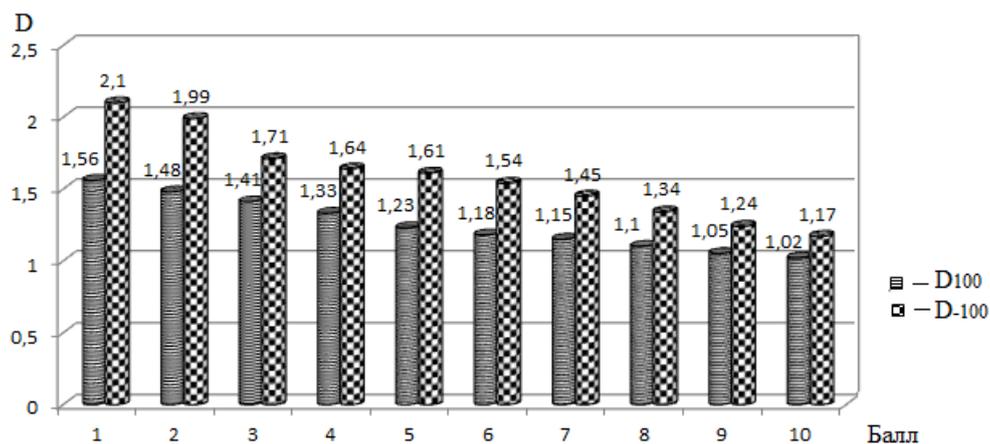


Рис. 3. Распределение балла дисперсности перлита в зависимости от статистических размерностей

Полученные результаты свидетельствуют о существовании чувствительности статистических размерностей пластинчатого перлита к изменениям его дисперсности, которая, в свою очередь, отражается на критериях качества сталей. С этих позиций раз-

мерности пластинчатого перлита можно использовать наряду с их балловой оценкой при прогнозе качества металла на основании анализа его структуры (см., к примеру [16-18]).

Выводы. Проведен мультифрактальный анализ структуры пластинчатого перлита в зависимости от изменения его дисперсности по балловой шкале 1 (ГОСТ 8233). Отмечается уменьшение значений статистических

размерностей пластин феррита и цементита при возрастании межпластинчатого расстояния от 0,2 мкм (балл 1) до 2 мкм и более (балл 10), что можно использовать при прогнозе качества сталей перлитного класса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph / B. B. Mandelbro. – New-York, San Francisco : W. H. Freeman, 1982. – 480 p. – Режим доступа : <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>. – Проверено: 30.05.2019.
2. Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2017. – № 6. – С. 46–50.
3. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2018. – Vol. 40. – № 9. – Pp. 1165–1171. – Режим доступа: <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>. – Проверено: 30.05.2019.
4. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступа: <http://dopovidi-nanu.org.ua/ru/archive/2017/4>. – Проверено: 30.05.2019.
5. Большаков В. И. Основы организации фрактального моделирования : [монография] / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров ; ГВУЗ "Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры". – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.
6. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2017. – Т. 39. – № 7. – С. 949–957. – Режим доступа: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>. – Проверено: 30.05.2019.
7. Bol'shakov V. Fractals and properties of materials : monograph / V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p. – Режим доступа: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>. – Проверено: 30.05.2019.
8. Большаков В. Пути применения теории фракталов : монография / В. Большаков, В. Волчук, Ю. Дубров. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2016. – 156 с. – Режим доступа: <https://www.morebooks.de/store/gb/book/%D0%9F%D1%83%D1%82%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B8-%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2/isbn/978-3-659-72264-6>. – Проверено: 30.05.2019.
9. Дубров Ю. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий на примере технологии производства прокатных валков : монография / Юрий Дубров, Владимир Большаков, Владимир Волчук. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с.
10. Zhuravel' I. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions / I. M. Zhuravel', L. M. Svir'ska // Materials Science. – 2010. – Vol. 46. – Iss. 3. – Pp. 418–420.
11. Большаков В. И. Разработка и исследование метода определения механических свойств металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2004. – № 1. – С. 43–54.
12. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник Національної академії наук України. – 2014. – № 12. – С. 45–48. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>. – Перевірено: 30.05.2019.
13. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / Volodymyr Volchuk, Ievgenii Klymenko, Sergii Kroviakov, Matija Orešković // Tehnički glasnik / Technical Journal. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 93–97. – Режим доступа: <https://hrcak.srce.hr/202359>. – Проверено: 30.05.2019.
14. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой низколегированной стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2011. – Т. 33. – Вып. 3. – С. 347–360.
15. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/6255>. – Проверено: 30.05.2019.
16. Волчук В. Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2014. – № 3. – С. 12–19. – Режим доступа: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>. – Проверено: 30.05.2019.
17. Большаков В. И. Исследование микроструктурной однородности стали У8 с применением мультифрактального анализа / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2010. – № 4. – С. 31–38.
18. Большаков В. И. Фракталы в материаловедении : учебник / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Днепропетровск : ПГАСА, 2006. – 253 с.

REFERENCES

1. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. New-York. San Francisco : Freeman. 1982. 480 p.
2. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fraktal'nyy podkhod pri identifikatsii slozhnykh sistem* [Fractal approach to the identification of complex systems]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv, 2017, no. 6, pp. 46-50. Available at: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00> (in Russian).
3. Bolshakov V. I., Volchuk V. M. and Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1165–1171.
4. Bolshakov V. I., Volchuk V. M. and Dubrov Yu. I. *Topologicheskiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).
5. Bolshakov V. I., Volchuk V. M. and Dubrov Yu. I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kiev: Akademperiodika, 2017, 170 p. (in Russian).
6. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyskiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).
7. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. Fractals and properties of materials. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing. 2016. 140 p. Available at: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
8. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeneniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. Available at: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>. (in Russian).
9. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
10. Zhuravel' I. M. and Svirs'ka, L. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*, 2015, vol. 46, no 3, pp. 418-420.
11. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Razrabotka i issledovaniye metoda opredeleniya mekhanicheskikh svoystv metalla na osnove analiza fraktal'noy razmernosti yego mikrostruktury* [Development and study of the method for determining the mechanical properties of a metal based on an analysis of the fractal dimension of its microstructure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2004, no. 1, pp. 43–54. (in Russian).
12. Bol'shakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
13. Volchuk V., Klivenko I., Kroviakov S., Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik - Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97. Available at: <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
14. Bolshakov V.I. and Volchuk V.N. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya veyvletno-mul'tifraktal'nogo podkhoda dlya otsenki struktury i svoystv malouglerodistoy stali* [Material science aspects of the use of wavelet and multifractal approach for assessing of the structure and properties of low-carbon steel]. *Metallofizika i noveyskiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2011, vol. 33, no. 3, pp. 347–360. (in Russian).
15. Bolshakov V. I., Volchuk V. N. and Dubrov Yu. I. *Osobennosti primeneniya mul'tifraktal'nogo formalizma v materialovedenii* [Features of the multifractal formalism in materials]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 11, pp. 99–107. (in Russian).
16. Volchuk V.N. *K voprosu o primenenii teorii mul'tifraktalov dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv metalla* [On the application of the theory of multifractals for the evaluation of the mechanical properties of a metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
17. Bolshakov V.I. and Volchuk V.N. *Issledovaniye mikrostrukturnoy odnorodnosti stali U8 s primeneniym mul'tifraktal'nogo analiza* [Investigation of the microstructural uniformity of U8 steel with the use of multifractal analysis]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2010, no. 4, pp. 31–38. (in Russian).
18. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Fraktaly v materialovedenii* [Fractals in materials]. Dnipropetrovsk : PSACEA, 2005, 253 p. (in Russian).

Рецензент: Дубров Ю. І., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 17.11.2018 р.