

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.230419.49.293

## МОДЕЛЬ ОЦІНКИ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

СІЗОВА О. Р.<sup>1\*</sup>, бакалавр,  
ЖИВИЦЯ О. Р.<sup>2</sup>, бакалавр

<sup>1</sup> 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: [00lena00@ro.ru](mailto:00lena00@ro.ru)

<sup>2</sup> 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: [Lelja200397@rambler.ru](mailto:Lelja200397@rambler.ru)

**Анотація. Вступ.** Перспективним напрямком оцінки структури матеріалів є застосування фрактального формалізму. Його використання дозволяє прогнозувати деякі властивості матеріалів на основі дослідження впливу на них різних режимів обробки, що призводить до зміни фрактальної розмірності елементів структури. Зокрема, чутливість механічних властивостей до фрактальної розмірності структури виявлена для маловуглецевих сталей та чавунних валків. В роботі запропоновано провести пасивний експеримент, метою якого являється встановлення відповідності між механічними властивостями середньовуглецевої сталі та фрактальної розмірності елементів її структури. **Пасивний експеримент.** В ході проведення експерименту встановлена відповідність між фрактальною розмірністю перліту сталі 115 та показниками її твердості НВ і межі плинності  $\sigma_T$ . Показники твердості та міцності досліджуваної сталі зростають при збільшенні фрактальної розмірності перліту з 1,680 до 1,917. Такий підхід можна використовувати при прогнозі показників міцності середньовуглецевих сталей на основі аналізу фрактальної розмірності перліту. Фрактальна розмірність структури визначалась за допомогою методики, що об'єднує клітинний та крапковий способи, що збільшило точність її обчислення. **Висновки.** Отримана фрактальна модель оцінки межі плинності та твердості сталі 115 на основі аналізу структури перліту після різних режимів термічної обробки. Результати свідчать про чутливість механічних властивостей до зміни фрактальної розмірності елементів структури внаслідок дії термічної обробки.

*Ключові слова:* структура; механічні властивості; перліт; фрактальна розмірність; термічна обробка

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

СІЗОВА Е. Р.<sup>1\*</sup>, бакалавр,  
ЖИВИЦЯ Е. Р.<sup>2</sup>, бакалавр

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [00lena00@ro.ru](mailto:00lena00@ro.ru)

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [Lelja200397@rambler.ru](mailto:Lelja200397@rambler.ru)

**Аннотация. Введение.** Перспективным направлением оценки структуры материалов является применение фрактального формализма. Его использование позволяет прогнозировать некоторые свойства материалов на основе исследования воздействия на них различных режимов обработки, что приводит к изменению фрактальной размерности элементов структуры. В частности, чувствительность механических свойств к фрактальной размерности структуры обнаружена для малоуглеродистых сталей и чугуновых валков. В работе предложено провести пассивный эксперимент, целью которого является установление соответствия между механическими свойствами среднеуглеродистой стали и фрактальной размерностью элементов ее структуры. **Пассивный эксперимент.** В ходе проведения эксперимента установлено соответствие между фрактальной размерностью перлита стали 115 и показателями ее твердости НВ, и предела текучести  $\sigma_T$ . Показатели твердости и прочности исследуемой стали возрастают при увеличении фрактальной размерности перлита с 1,680 до 1,917. Такой подход можно использовать при прогнозе показателей прочности среднеуглеродистых сталей на основе анализа фрактальной размерности перлита. Фрактальная размерность структуры определялась с помощью методики, объединяющей клеточный и точечный способы, что увеличило точность ее вычисления. **Выводы.** Получена фрактальная модель оценки предела текучести и твердости стали 115 на основе анализа структуры перлита после различных режимов термической обработки. Результаты свидетельствуют о чувствительности механических свойств к изменениям фрактальной размерности элементов структуры вследствие действия термической обработки.

*Ключевые слова:* структура; механические свойства, перлит; фрактальная размерность; термическая обработка

## MODEL ESTIMATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM CARBON STEEL

SIZOVA O.R.<sup>1\*</sup>, *bachelor*,  
ZHIVITSA O.R.<sup>2</sup>, *bachelor*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: e-mail: [00lena00@ro.ru](mailto:00lena00@ro.ru)

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [Lelja200397@rambler.ru](mailto:Lelja200397@rambler.ru)

**Abstract. Introduction.** A promising direction in the evaluation of the structure of materials is the use of fractal formalism. Its use makes it possible to predict some properties of materials on the basis of studying the effects on them of various processing modes, which leads to a change in the fractal dimension of the elements of the structure. In particular, the sensitivity of mechanical properties to the fractal dimension of the structure was found for low carbon steels and cast iron rolls. It was proposed to conduct a passive experiment, the purpose of which is to establish the correspondence between the mechanical properties of medium-carbon steel and the fractal dimension of the elements of its structure. **Passive experiment.** In the course of the experiment, a correspondence was established between the fractal dimension of perlite steel 115 and its hardness values HB, and yield strength  $\sigma_T$ . Indicators of hardness and strength of the investigated steel increase with increasing fractal dimension of perlite from 1,680 to 1,917. Such an approach can be used in predicting the strength indicators of medium carbon steels based on the analysis of the fractal dimension of perlite. The fractal dimension of the structure was determined using a technique that combines cellular and point methods, which increased the accuracy of its calculation. **Conclusions.** A fractal model for estimating the yield strength and hardness of steel 115 was obtained on the basis of an analysis of the structure of perlite after various heat treatment conditions. The results indicate the sensitivity of the mechanical properties with a change in the fractal dimension of the elements of the structure due to the action of heat treatment.

*Keywords:* structure; mechanical properties, perlite; fractal dimension; heat treatment

### Вступ

Застосування математичних методів [1–3] для оцінки структури та властивостей матеріалів призводить до економії коштів на прямі іспити. Крім того вони застосовуються в ситуаціях, коли прямі іспити в силу технічних обмежень провести дуже складно. Тому їх розвиток важливий як з наукової, так і з практичної точок зору.

Перспективним підходом з точки зору оцінки структури металів на різних масштабних рівнях є застосування теорії фракталів та мультифракталів [4–6]. Основи фрактального моделювання для оцінки структури і властивостей матеріалів розкриті в роботах [7; 8]. Мову фрактального формалізму використовують при вирішенні некоректних задач матеріалознавства [9], ідентифікації багатокритеріальних технологій [10], складних систем [11], ранжуванні критеріїв якості багатопараметричних технологій [12], для прогнозу механічних властивостей чавунних валків [13] та маловуглецевих сталей [14] шляхом встановлення чутливості фрактальної розмірності структури до критеріїв якості [15].

В роботі запропоновано дослідити зміни структури середньовуглецевої сталі після термічної обробки шляхом реєстрації фрактальної розмірності її складових.

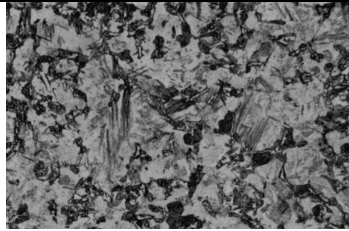
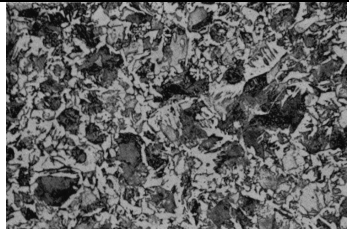
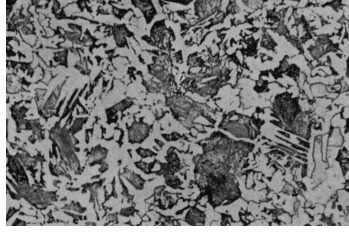
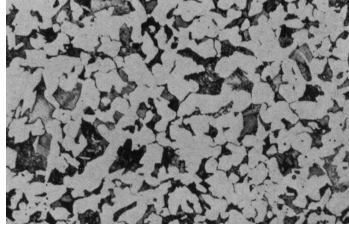
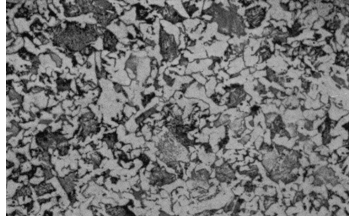
### Пасивний експеримент

Метою пасивного експерименту являлося зафіксувати вплив структури та властивості середньовуглецевої сталі шляхом використання фрактального формалізму, тобто шляхом співставлення отриманих експериментальних даних зі значеннями фрактальної розмірності елементів структури. Фрактальна розмірність  $D$  елементів структури визначалася за розробленою та запатентованою методикою [16]. В основі цієї методики лежить пошук збіжності значень фрактальної розмірності обчисленої за допомогою клітинного та крапкового методів. Пасивний експеримент побудовано на обробці статистичних даних по хімічному складу, режимам обробки та механічним властивостям, що взяті по марці сталі 115 [17]. Результати по статистичним даним та фрактальним розмірності структури наведено в таблиці.

Хімічний склад (% по масі): C – 0,33; Si – 0,25; Mn – 0,55; P – 0,032; S – 0,03; Cr – 0,14; Cu – 0,23; Mo – 0,01; N – 0,01. Для термообробки зразки нагрівались до 860 °С при витримці 300 с та охолоджувались в різних середовищах до зазначеної температури і часу в наведеній (табл.). Фрактальна розмірність перліту визначалась при збільшенні структури в 500 разів.

Таблиця

## Вихідні дані / Initial data

Час охолодження, $t$	Твердість $HV$	Межа плинності $\sigma_T$ , МПа	Фрактальна розмірність перліту, $D$	Структура
500 °C 2,2 сек	415	1 305	1,917	
500 °C 7 сек	233	720	1,803	
500 °C 30 сек	212	655	1,732	
500 °C 65 сек	192	590	1,626	
Вода, 650 °C 300 сек	209	645	1,753	

Структура сталі 115 після охолодження до 500 °C протягом 2,2 сек складалася з сітки фериту ~ 7 %, перліту у вигляді окремих ділянок ~ 12 %, голчатого бейніту ~ 12 % та мартенситу ~ 69 %. Після охолодження тривалістю 7 сек структура складалася з 35 % фериту і 65 % перліту; після 30 сек – 50 % фериту та 50 % перліту; після 65 сек – 65 % фериту та 35 % перліту. Після охолодження тривалістю 300 сек ферит та перліт мав форму великих областей неправильної форми, що підкреслює їх фрактальну природу. Структура сталі в цьому випадку складалася з 60 % фериту та 40 % перліту відповідно.

На рисунках 1 та 2 наведені співвідношення між часом охолодження  $t$ , механічними властивостями  $HV$  та  $\sigma_T$ , фрактальною розмірністю перліту  $D$  і рівняння регресії, що їх описують.

З наведених рисунків випливає, що збільшення часу охолодження сталі призводить до зменшення фрактальної розмірності перліту та до зменшення показників міцності сталі 115.

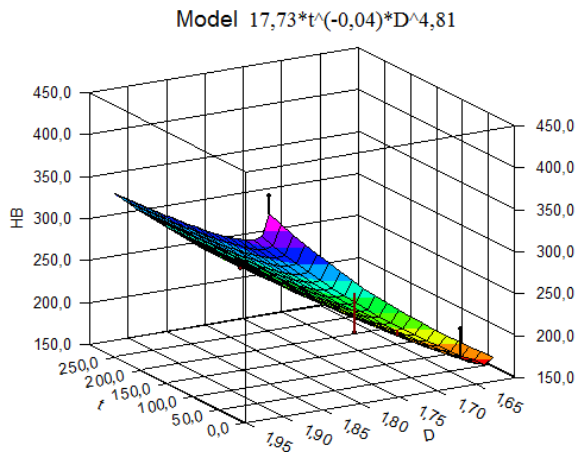


Рис. 1. Залежність твердості від фрактальної розмірності перліту та часу витримки /  
Fig. 1. Dependence of hardness on the fractal dimension of perlite and time of endurance

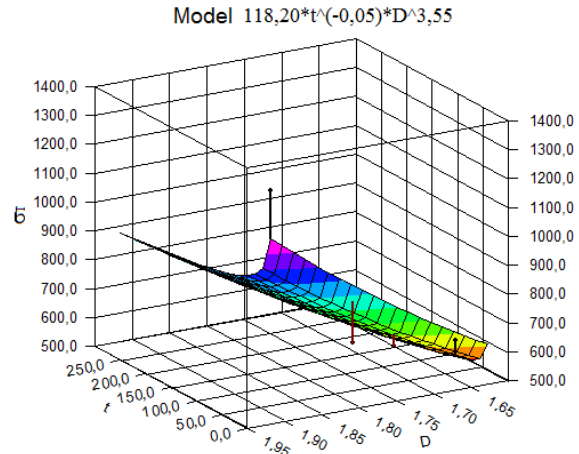


Рис. 2. Залежність межі плинності від фрактальної розмірності перліту та часу витримки /  
Fig. 2. Dependence of the yield strength on the fractal dimension of perlite and the time of endurance

Отримані результати свідчать про те, що фрактальна розмірність елементів структури змінюється в межах від 1,680 до 1,917, тобто чутлива до впливу термічної обробки, що можна застосовувати про прогнозі критеріїв якості середньовуглецевих сталей.

## Висновки

Шляхом застосування фрактального моделювання отримані рівняння оцінки твердості та межі плинності від температури охолодження та фрактальної розмірності перліту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Mishutn A. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures / A. Mishutn, S. Kroviakov, O. Pishev, B. Soldo // Technical Journal. – 2017. – Vol. 11, № 3. – Pp. 121–124. – Режим доступу : <https://hrcak.srce.hr/186657>
- Большаков В. И. Применение теоретико-информационного подхода для идентификации структуры металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 8. – С. 4–9. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/4134>
- Большаков В. И. О применении имитационного моделирования в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 4. – С. 26–31. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>
- Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph / [B. B. Mandelbrot]. – New-York, San Francisco : Freeman, 1982. – 480 p. – Режим доступу : <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
- Fractals and properties of materials : monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p.
- Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>
- Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
- Большаков В. И. Организация фрактального моделирования / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2018. – № 6. – С. 67–72. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.067>
- Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally Ill-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 доступу : <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>
- Пути индентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с.
- Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 6. – С. 46–50. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00>
- Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступу : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>

13. Volchuk V. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // *Tehnički glasnik – Technical Journal*. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 93–97. – Режим доступу : <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>

14. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2011. – Т. 33. – № 3. – С. 347–360.

15. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Доповіді НАН України*. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступу : <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>

16. Большаков В. И., Дубров Ю. И., Криулін Ф. В., Волчук В. М. Патент на винахід № 51439А. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення. – Бюл. № 11. – 15.11.2002.

17. *Металлография железа. Том 2. Структура сталей / Под ред. академика Ф. Н. Тавадзе*. – Москва : *Металлургия*, 1972. – 284 с.

## REFERENCES

1. Mishutn A., Kroviakov S., Pishev O. and Soldo B. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. *Technical Journal*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124.

2. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye teoretiko-informatsionnogo podkhoda dlya identifikatsii struktury metalla* [The use of information – theoretic approach to identify the structure of the metal]. *Visnyk Prydniprov'skoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).

3. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii imitatsionnogo modelirovaniya v materialovedenii* [The application simulated modelling in materials science]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 4, pp. 26–31. (in Russian).

4. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New-York, San Francisco : *Freeman*, 1982, 480 p.

5. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : *Lambert Academic Publishing*, 2016, 140 p.

6. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskkiye 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).

7. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).

8. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Organizatsiya fraktal'nogo modelirovaniya* [Organization of fractal modeling]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2018, no. 6, pp. 67–72. (in Russian).

9. 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.

10. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrucken : *Palmarium Academic Publishing*, 2015, 236 p. (in Russian).

11. 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]. 2017, no. 6, pp. 46–50. (in Russian).

12. 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 noveyshiy tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).

13. Volchuk V., Klymenko 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.

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 the structure and properties of low-carbon steel]. *Metallofizika i noveyshiy 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. Bol'shakov V.I., Dubrov Yu.I., Kryulin F.V. and Volchuk V.N. *Sposib vyznachennya fraktal'noyi rozmirnosti zobrazhennya* [Method for determining fractal dimensionality of an image]. Patent product no. 51439A, UA. MPK 7 G06K9/00, bulletin no. 11, 2002. (in Ukrainian).

17. *Metallografiya zheleza* [Iron metallography]. Vol. 2. *Struktura staley* [The structure of steel]. Ed. Academician F.N. Tavadze. Moscow : *Metallurgy Publ.*, 1972, 284 p. (in Russian).

*Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, доц. В. М. Волчуком (Україна) д-ром техн. наук, проф. Ю. І. Дубровим (Україна).*

Надійшла до редакції 12.02.2019.

Прийнята до друку 17.02.2019.