

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241120.38.689

АНАЛІЗ БАЛОВОЇ МАРТЕНСИТНОЇ СТРУКТУРИ

ВОЛЧУК В. М., *докт. техн. наук, доц.*

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

Анотація. Вступ. Мартенситна структура сталей, що формується шляхом механізму зсуву атомних ґраток за рахунок швидкого охолодження, в різних середовищах має складну форму на різних масштабних рівнях її представлення. Традиційно аналіз мартенситної структури на мікроструктурному рівні здійснюється шляхом використання балової шкали, що являє собою напівкількісну характеристику. Однак такий підхід не завжди задовольняє результатам кількісного оцінювання мартенситної структури сталей та прогнозу їх службових характеристик, зокрема, механічних. Для кількісного оцінювання мартенситної структури сталей використано фрактальний підхід. **Матеріали та методика.** Досліджувалася балова шкала мартенситної структури (балова оцінка 1–10) згідно з ГОСТ 8233 із застосуванням фрактального формалізму. Методика визначення фрактальної розмірності базується на запатентованій методиці, що включає пошук збіжності значень фрактальної клітинної та точкової розмірностей. Застосована методика підвищує адекватність отриманих значень фрактальної розмірності структури досліджуваного матеріалу. **Результати експерименту.** Шляхом визначення розмірності балової мартенситної структури встановлено, що вона дробна, тобто фрактальна. Зафіксовано збільшення фрактальної розмірності голок мартенситу за підвищення їх балу. Подібна тенденція спостерігається також для фрактальної розмірності меж зерен (голок) мартенситу, що зростає при збільшенні балової оцінки. Зростання фрактальної розмірності мартенситу може бути зумовлене зміною його морфології від прихованого голчатої до грубого голчатої. **Висновки.** Проведено аналіз балової мартенситної структури згідно з нормативними документами. Отримано регресійні моделі оцінки балової мартенситної структури залежно від її фрактальної розмірності ($R^2 = 0,81$) та меж зерен ($R^2 = 0,67$). Це свідчить про можливість застосування фрактального підходу як альтернативного, до контролю структури мартенситу після різних режимів термічної обробки.

Ключові слова: мартенсит; фрактальна розмірність; балова оцінка; методика; регресійна модель

АНАЛИЗ БАЛОВОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРЫ

ВОЛЧУК В. Н., *докт. техн. наук, доц.*

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

Аннотация. Введение. Мартенситная структура сталей, формирующаяся путем механизма сдвига атомных решеток за счет быстрого охлаждения, в различных средах имеет сложную форму на различных масштабных уровнях ее представления. Традиционно анализ мартенситной структуры на микроструктурном уровне осуществляется путем использования балловой шкалы, которая является полуколичественной характеристикой. Однако такой подход не всегда удовлетворяет результатам количественной оценки мартенситной структуры сталей и прогноза их служебных характеристик, в частности, механических. Для количественной оценки мартенситной структуры сталей использовался фрактальный подход. **Материалы и методика.** Исследовалась балловая шкала мартенситной структуры (балловая оценка 1–10) согласно ГОСТ 8233 с применением фрактального формализма. Методика определения фрактальной размерности базируется на запатентованной методике, включающей поиск сходимости значений фрактальной клеточной и точечной размерностей. Применяемая методика повышает адекватность полученных значений фрактальной размерности структуры исследуемого материала. **Результаты эксперимента.** Путем определения размерности балловой мартенситной структуры установлено, что она дробная, то есть является фрактальной. Зафиксировано увеличение фрактальной размерности игл мартенсита при повышении их балла. Подобная тенденция наблюдается также для фрактальной размерности границ зерен (игл) мартенсита, которая растет при увеличении балловой оценки. Рост фрактальной размерности мартенсита может быть обусловлен изменением его морфологии от скрытоигольчатой к грубоигольчатой. **Выводы.** Проведен анализ балловой мартенситной структуры в соответствии с нормативными документами. Получены регрессионные модели оценки балловой мартенситной

структури в залежності від її фрактальної розмірності ($R^2 = 0,81$) і границ зерен ($R^2 = 0,67$). Це свідчить про можливість застосування фрактального підходу як альтернативного при контролі структури мартенсита після різних режимів термічної обробки.

Ключевые слова: мартенсит; фрактальна розмірність; баллова оцінка; методика; регресійна модель

STUDY OF THE EFFECT OF CARBON ON THE FRACTAL DIMENSION OF STEEL

VOLCHUK V.M., *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

Department of Materials Science, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

Abstract. Introduction. The martensitic structure of steels arising by the mechanism of atomic lattice shift due to rapid cooling in various media has a complex shape at various scale levels of its representation. Traditionally, the analysis of the martensitic structure at the microstructural level is carried out using a point scale, which is a semi-quantitative characteristic. However, this approach does not always satisfy the results of a quantitative assessment of the martensitic structure of steels and the prediction of their service characteristics, in particular, mechanical ones. A fractal approach was used to quantify the martensitic structure of steels. **Materials and methods.** The work investigated the point scale of the martensitic structure (point grade 1–10) according to ГОСТ 8233 using fractal formalism. The method for determining the fractal dimension is based on a patented technique, including the search for the convergence of the values of the fractal cell and point dimensions. The applied technique increases the adequacy of the obtained values of the fractal dimension of the structure of the material under study. **Experiment Results.** By determining the dimension of the point martensite structure, it was established that it is fractional, that is, it is fractal. An increase in the fractal dimension of martensite needles with an increase in their score was recorded. A similar trend is also observed for the fractal dimension of the grain boundaries (needles) of martensite, which increases with an increase in the score. An increase in the fractal dimension of martensite may be due to a change in its morphology from latent-acicular to coarse-acicular. **Conclusions.** The analysis of the point martensite structure is carried out in accordance with the normative documents. Regression models for evaluating the martensitic structure in terms of its fractal dimension ($R^2 = 0,81$) and grain boundaries ($R^2 = 0,67$) are obtained. This indicates the possibility of using the fractal approach, as an alternative, when controlling the structure of martensite after different modes of heat treatment.

Keywords: martensite; fractal dimension; scoring; methodology; regression model

Вступ. У стандартних нормативних документах для визначення структури металевих матеріалів застосовується балова оцінка. Така статистична оцінка напівкількісна й несе в собі лише часткову інформацію про будову матеріалу [1–3]. Це пов'язано з тим, що реальна структура багатьох матеріалів складна та не завжди піддається однозначному оцінюванню традиційними методиками [4–6]. Тому не існує єдиного критерію оцінювання структури, що дозволяє встановити строгу відповідність між структурою та властивостями.

Однією з причин подібної невідповідності може бути неповнота формальної аксіоматики, що породжується застосуванням лише традиційних методів,

що, в основному, базуються на цілочисловій геометрії Евкліда [7; 8].

Мартенситна структура, що здебільшого описується баловою шкалою, також має складну геометричну конфігурацію форми своїх елементів (голок мартенситу). Вона описується за допомогою балової шкали 1–10 згідно з ГОСТ 5639.

Для часткової компенсації неповноти формальної аксіоматики, що виникає в процесі описання структур матеріалів, останнім часом активно застосовують фрактальний підхід [9–12]. Застосування теорії фракталів у металознавстві дозволяє прогнозувати механічні характеристики сталей [13–15], чавунів [16; 17], здійснювати альтернативний аналіз балової шкали розмірів зерна сталей [18]; проводити ранжування критеріїв якості

багатопараметричних технологій [19; 20]; оцінювати кількість вуглецю в перлітній структурі [21] тощо.

У роботі проведено фрактальний аналіз балової мартенситної шкали № 3 (ГОСТ 8233) на предмет установлення відповідності між фрактальною розмірністю мартенситу та його баловою оцінкою.

Матеріали та методика. Досліджувалась мартенситна шкала № 3 згідно з ГОСТ 8233, де мартенсит залежно від лінійних розмірів своїх голок (довжини) оцінювався по балах 1–10 (табл.).

Таблиця

Характеристика мартенситної шкали № 3

Бал	Характеристика мартенситу	Найбільша довжина голок, мкм
1	прихованоголчатий	Менше 0,2
2	дуже дрібноголчатий	2,0
3	дрібноголчатий	4,0
4	дрібноголчатий	6,0
5	середньоголчатий	8,0
6	середньоголчатий	10,0
7	крупноголчатий	12,0
8	крупноголчатий	16,0
9	крупноголчатий	20,0
10	грубоголчатий	більше 20,0

Фрактальну розмірність балової шкали мартенситу розраховували за запатентованою методикою [22], що базується на збіжності клітинної та точкової фрактальних розмірностей. Ця методика випробувана на різних видах матеріалів різного призначення [23; 24].

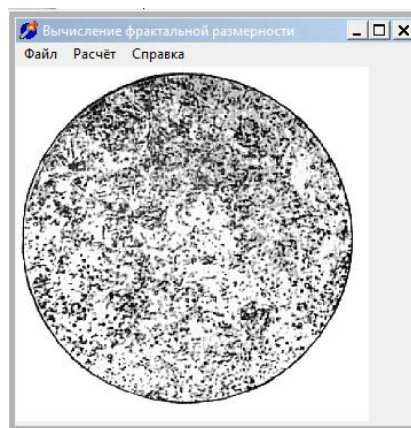
Результати розрахунку балової шкали мартенситу за допомогою розробленої методики наведені на рисунку 1. На рисунку 1 уведено такі величини: D_t – фрактальна розмірність голок мартенситу; $I(n)$ – розмір клітинки в пікселях згідно з комп'ютерною обробкою.

Із рисунка 1 б випливає, що найкраща збіжність показників фрактальної розмірності балової оцінки 1 спостерігається на четвертому кроці обчислень. Тому це середнє значення дробної розмірності

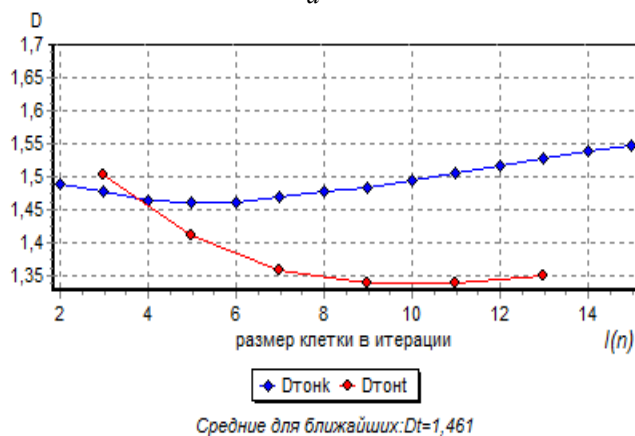
мартенситу 1,461 бралось для наступних розрахунків і т. д.

Результати експерименту. В ході експерименту досліджувався зв'язок між баловою оцінкою мартенситу (рис. 2) та його фрактальною розмірністю і розмірністю меж зерен (голок).

Отримані результати обчислень розмірності мартенситу свідчать, що ця характеристика являє собою дробну (фрактальну) величину (рис. 3). Одна з причин, що зумовлюють фрактальність мартенситної структури, – це складна геометрична конфігурація його голок, які формуються у відкритій системі в результаті дії механізму зсуву атомних ґраток швидкого охолодження металу.



а



б

Рис. 1. Комп'ютерна реалізація розрахунку фрактальної розмірності мартенситу: а – бал 1; б – результати розрахунку фрактальної розмірності: клітинна $D_{тонк}$ та точкова $D_{тонк}$ розмірності

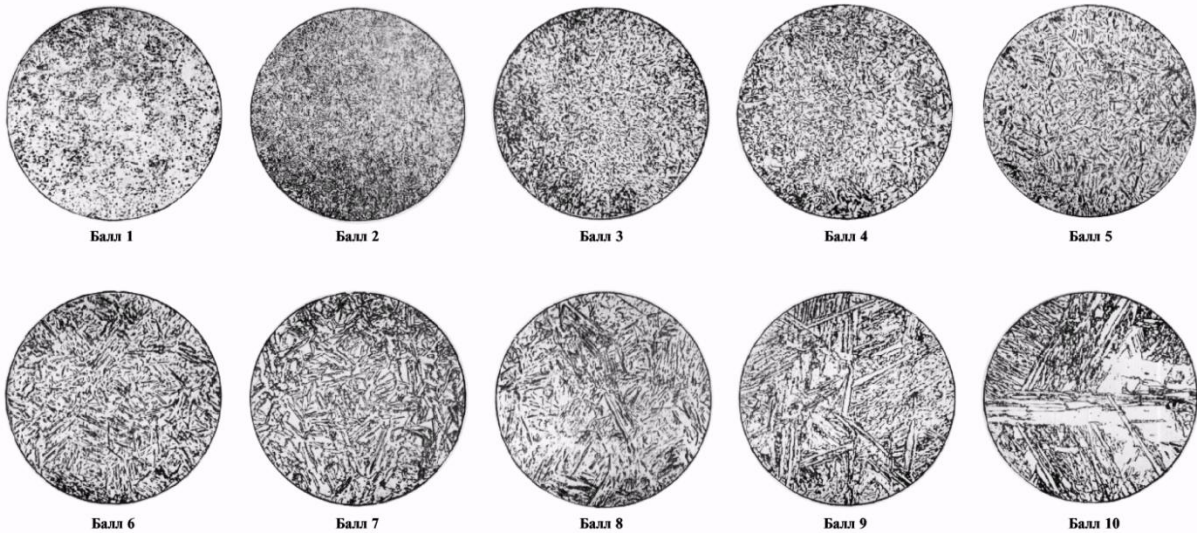


Рис. 2. Еталонна шкала 3 залежно від розмірів голок мартенситу у сталях, $\times 100$

Розмірність меж голок також постає фрактальною величиною (рис. 4).

Співвідношення між фрактальною розмірністю мартенситу D і бальною оцінкою n описується співвідношенням (1), а для меж голок D_{gp} – співвідношенням (2). Коефіцієнт парної регресії R^2 для поліноміальної моделі (1) становить 0,81, а для лінійної (2) – 0,67.

$$D = 0,0099n^2 - 0,0887n + 1,6125, \quad (1)$$

$$D_{gp} = 0,0204n + 1,5379. \quad (2)$$

Зафіксовано збільшення фрактальної розмірності голок мартенситу у разі підвищення їх бала. Подібна тенденція спостерігається також для фрактальної

розмірності меж зерен (голок) мартенситу, що зростає у разі збільшення бальної оцінювання. Зростання фрактальної розмірності мартенситу може бути зумовлене зміною його морфології від прихованого до грубого.

На рисунку 5 наведено розбіжність значень фрактальних розмірностей мартенситу та меж його голок $\Delta D = |D - D_{gp}|$.

Існування подібної розбіжності може свідчити, що фрактальний підхід є більш диференційованим для оцінювання реальних структур матеріалів порівняно з традиційним евклідовим (цілочисловим) підходом, оскільки в ньому враховується спосіб задання метрики [25].

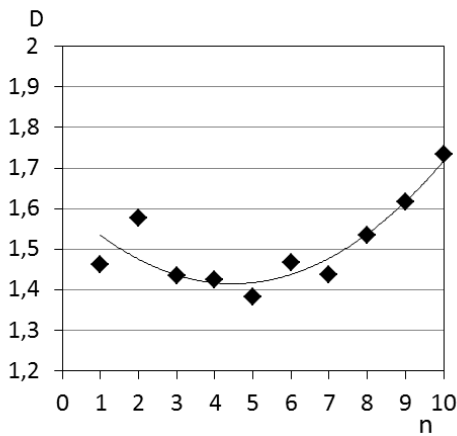


Рис. 3. Співвідношення між фрактальною розмірністю мартенситу та його бальною оцінкою

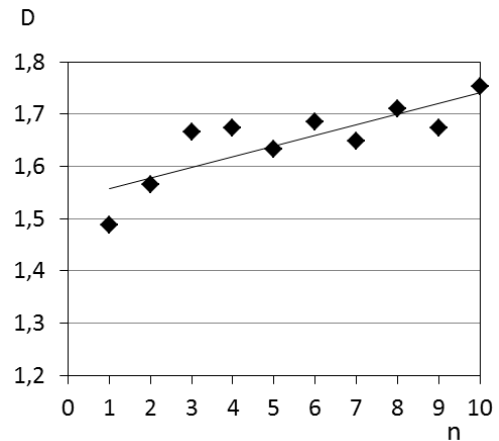


Рис. 4. Співвідношення між фрактальною розмірністю меж голок мартенситу та його бальною оцінкою

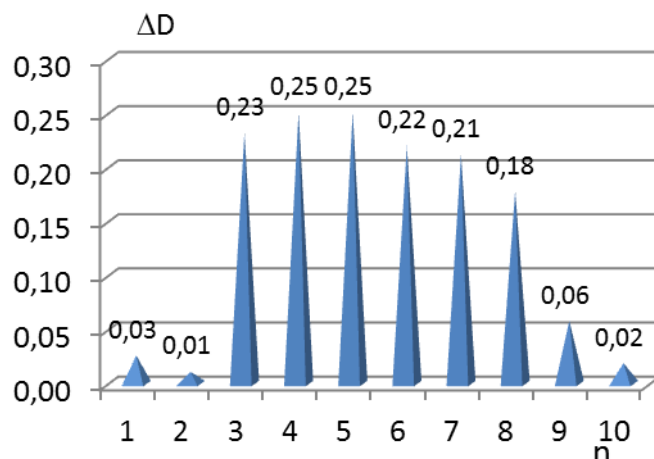


Рис. 5. Розбіжність значень між фрактальною розмірністю мартенситу та межами його зерен

Висновки. Встановлено відповідність між фрактальною розмірністю мартенситу та межами його зерен (голок) і еталонною шкалою № 3 (ГОСТ 8233). Отримані результати свідчать про існування чутливості

між даними показниками, що дозволяє застосовувати фрактальний підхід як експрес-методику оцінювання мартенситної структури сталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с. URL : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
2. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2013. № 4. С. 5–11.
3. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Основы организации фрактального моделирования : монография. Киев : Академперіодика, 2017. 170 с.
4. Волчук В. Н. О применении вейвлетно-мультифрактального анализа в задаче оценки структуры металла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ, 2015. № 9. С. 24–30. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/53726>
5. Волчук В. Н. Применение результатов вейвлетно-мультифрактального анализа структуры металла для прогноза его качества. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ, 2015. № 10. С. 16–20. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/56591>
6. 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. № 2. Pp. 93–97. URL : <https://hrcak.srce.hr/202359>
7. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL : <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
8. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Материаловедческие аспекты применения частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 5. С. 10–16. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/47385/43497>
9. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph. New-York, San Francisco : Freeman, 1982. 480 p. URL: <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
10. Zhuravel' I. M., Svir'ska L. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*. 2010. Vol. 46. № 3. Pp. 418–420.
11. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении. *Доповіді НАН України*. 2008. № 11. С. 99–107. URL: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
12. Большаков В., Волчук В., Дубров Ю. Пути применения теории фракталов : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. 146 с. URL : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>

13. Волчук В. Н. Определение чувствительности мультифрактальных характеристик металла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 12. С. 10–14. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/58941>
14. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. *UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium* (April 4–6, 2019). Karabuk, Turkey : Karabuk University, 2019. Vol. 4. Pp. 415–417. URL: <https://drive.google.com/open?id=1jfWwEhSuRl-3bGcv-dG7CzYnmMh7KcVT>
15. Волчук В. Н. Применение концепции мультифракталов для контроля качества низколегированной стали. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 3. С. 20–27. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.250918.20.3954>
16. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL : <https://DOI:10.15407/mfint.40.09.1165>
17. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СПХН-43 та СШХНФ-47. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.22.597>
18. Волчук В. Н. Фрактальный анализ балловой системы. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 5. С. 47–53. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/58941>
19. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий. *Металлофизика новейшие технологии*. 2017. Т. 39, № 3. С. 949–957. URL : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>
20. Kroviakov S., Volchuk V., Zavaloka M., Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019. Vol. 968. Pp. 20–25. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>
21. Волчук В. М., Іванцов С. В., Тютєрев І. А. Дослідження впливу вуглецю на фрактальну розмірність сталі. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 3. С. 31–39. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.070720.31.638>
22. Большаков В. И., Дубров Ю. И., Криулин Ф. В., Волчук В. М. Патент на винахід № 51439А України. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення. Бюл. № 11. 15.11.2002. URL: <http://uapatents.com/3-51439-sposib-viznachennya-fraktalno-rozmirnosti-zobrazhennya.html>
23. Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Fractal approach in assessing the quality of steel 20. *Innovative Lifecycle Technologies of Housing, Industrial and Transportation Objects : collective monograph; under the general editorship Savytskyi M. Dnipro : SHEE “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” ; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. Pp. 48–53. URL : <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/1380>*
24. Волчук В. М. Моделювання властивостей конструкційних матеріалів. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 1. С. 21–35. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/201950>
25. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. К определению метрики объекта идентификации. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 4. С. 10–14. URL : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/10-14/85306>

REFERENCES

1. 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).
2. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Identifikatsiya mnogoparametricheskikh, mnogokriterial'nykh tekhnologiy i puti ikh prakticheskoy realizatsii* [Multiparameter identification, multicriteria techniques and ways of their implementation]. *Metall Science and Heat Treatment of Metals*. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
3. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kyiv : Akadempriodika, 2017, 170 p. (in Russian).
4. Volchuk V.N. *O primeneni veyvletno-mul'tifraktal'nogo analiza v zadache otsenki struktury metalla* [The application of wavelet-multifractal analysis in problems of metal structure]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 9, pp. 24–30. (in Russian).
5. Volchuk V.N. *Primeneniye rezul'tatov veyvletno-mul'tifraktal'nogo analiza struktury metalla dlya prognoza yego kachestva* [Application of results of wavelet and multifractal analysis of metal structure for prognosis of its quality]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 10, pp. 16–20. (in Russian).
6. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.

7. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. Fractals and properties of materials. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
8. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya chastichnoy kompensatsii nepolnoty formal'noy aksiomatiki* [Material aspects of use of partial compensation of incompleteness of formal axiomatics]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 5, pp. 10–16. (in Russian).
9. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p.
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. 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).
12. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeneniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).
13. Volchuk V.M. *Opredeleniye chuvstvitel'nosti mul'tifraktal'nykh kharakteristik metalla* [Determining the sensitivity of the multifractal characteristics of metals]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 12, pp. 10–14. (in Russian).
14. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium, April 4–6, 2019, Karabuk University, Karabuk, Turkey, 2019, vol. 4, pp. 415–417.
15. Volchuk V.M. *Primeneniye kontseptsii mul'tifraktalov dlya kontrolya kachestva nizkolegirovannoy stali* [Application of the concept of multifractal to control the quality of low-alloy steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 3, pp. 20–27. (in Russian).
16. 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. URL : <https://DOI:10.15407/mfint.40.09.1165>
17. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv CIIXH-43 ta CIIXHΦ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers CIIXH-43 and CIIXHΦ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2019, no. 4, pp. 22–35. (in Ukrainian).
18. Volchuk V.M. *Fraktal'nyy analiz ballovoiy sistemy* [Fractal analysis of the point system]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 5, pp. 47–53. (in Russian).
19. 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 noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. URL : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>. (in Russian).
20. Kroviakov S., Volchuk V., Zavaloka M., and Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019, vol. 968, pp. 20–25.
21. Volchuk V.M. *Doslidzhennya vplyvu vuhletsyu na fraktal'nu rozmirnist' stali* [Study of the effect of carbon on the fractal dimension of steel]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 3, pp. 31–39. (in Russian).
22. Bol'shakov V.I., Dubrov Yu.I., Kryulin F.V. and Volchuk V.N. Sposib vyznachennya fraktal'noyi rozmirnosti zobrazhennya [Method for Determining the Dimensionality of Images]. Patent product no. 51439A, UA. MPK 7 G06K9/00, bulletin no. 11, 2002. (in Ukrainian).
23. Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. Fractal approach in assessing the quality of steel 20. *Innovative Lifecycle Technologies of Housing, Industrial and Transportation Objects : collective monograph; under the general editorship Savytskyi M. Dnipro : SHEE “Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture”;* Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, pp. 48–53.
24. Volchuk V.M. *Modelyuvannya vlastivostej konstrukciynih materialiv* [Modeling properties of structural materials]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2020, no. 1, pp. 21–35. (in Ukrainian).
25. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu metriki ob"yekta identifikatsii* [To the definition of the identity metric]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 4, pp. 10–14. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 30.10.2020.