

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250918.28.395

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТВЕРДОСТІ ЛИСТОПРОКАТНИХ ВАЛКІВ

ВОЛЧУК В. М.^{1*}, д. т. н., доц.,
ДУБРОВ Ю. І.², д. т. н., проф.

^{1*} 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

² 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: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Анотація. Постановка задачі. У зв'язку з технологією виробництва та експлуатацією проводити оцінку механічних властивостей масивних чавунних відливок не завжди можливо за допомогою натурних іспитів. Тому прогноз властивостей, зокрема листопркатних чавунних валків, здійснюють за допомогою моделювання шляхом аналізу впливу параметрів технології. До параметрів технології, що впливають на формування структури чавунних валків, слід віднести хімічний склад, швидкість охолодження, тощо. Оскільки структура матеріалів значним чином впливає на їх властивості, але при цьому не завжди можна провести кількісну параметризацію її елементів за допомогою класичних методів, в роботі пропонується оцінювати якість валків на основі мультифрактального аналізу структури. **Матеріали і методики досліджень.** В якості матеріалу для дослідження обрано листопркатні валки ЛПХ17НМдц-63, структура та властивості яких оцінювалися з використанням теорії мультифракталів, твердоміру Шора, металографічного аналізу, математичного моделювання. Відзначається, що збільшення вмісту хрому до 17 % в білій зоні впливає на утворення стійких карбідів та призводить до підвищення показників твердості з 47 до 76 одиниць Шора у порівнянні з сірою зоною. **Результати та їх обговорення.** Досліджувався вплив елементів структури білої зони бочки валка (від 0 до 50 мм від поверхні). Встановлені співвідношення між найбільш чутливими показниками із спектру розмірностей елементів структури білої зони: D_0 та D_{+100} розмірностями аустеніту; D_0 та D_{-100} розмірностями карбідів хрому і показниками твердості валків. Отримані моделі прогнозу твердості робочої зони бочок валків ЛПХ17НМдц-63 від розмірностей аустеніту (коефіцієнти кореляції $R^2 = 0,71$ і $R^2 = 0,85$) та карбідів хрому ($R^2 = 0,95$ і $R^2 = 0,89$). **Висновки.** Результати дослідження свідчать про доцільність застосування мультифрактальної моделі структури до прогнозу показників твердості робочої зони бочок валків ЛПХ17НМдц-63.

Ключові слова: мультифрактал; структура; спектр розмірностей; чавунні валки; твердість

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТВЕРДОСТІ ЛИСТОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

ВОЛЧУК В. Н.^{1*}, д. т. н., доц.,
ДУБРОВ Ю. И.², д. т. н., проф.

^{1*} 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

² 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: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Аннотация. Постановка задачи. В связи с технологией производства и эксплуатацией проводить оценку механических свойств массивных чугуных отливок не всегда возможно с помощью натуральных испытаний. Поэтому прогноз свойств, в частности листопркатных чугуных валков, осуществляют с помощью моделирования путем анализа влияния параметров технологии. К параметрам технологии, влияющим на формирование структуры чугуных валков, следует отнести химический состав, скорость охлаждения, и тому подобное. Поскольку структура материалов значительным образом влияет на их свойства, но при этом не всегда можно провести количественную параметризацию ее элементов с помощью классических методов, в работе предлагается оценивать качество валков на основе мультифрактального анализа структуры. **Материалы и методики исследований.** В качестве материала для исследования выбраны листопркатные валки ЛПХ17НМдц-63, структура и свойства которых оценивались с использованием теории мультифрактала, твердомера Шора, металлографического анализа, математического моделирования. Отмечается, что увеличение содержания хрома до 17 % в белой зоне влияет на образование устойчивых карбидов и приводит к повышению показателей твердости с 47 до 76 единиц

Шора по сравнению с серой зоной. **Результаты и их обсуждение.** Исследовалось влияние элементов структуры белой зоны бочки вала (от 0 до 50 мм от поверхности). Установлены соотношения между наиболее чувствительными показателями из спектра размерностей элементов структуры белой зоны: D_0 и D_{+100} размерностями аустенита; D_0 и $D_{.100}$ размерностями карбидов хрома и показателями твердости валков. Получены модели прогноза твердости рабочей зоны бочек валков ЛПХ17НМдц-63 от размерностей аустенита (коэффициенты корреляции $R^2 = 0,71$ и $R^2 = 0,85$) и карбидов хрома ($R^2 = 0,95$ и $R^2 = 0,89$). **Выводы.** Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности применения мультифрактальной модели структуры к прогнозу показателей твердости рабочей зоны бочек валков ЛПХ17НМдц-63.

Ключевые слова: мультифрактал; структура; спектр размерностей; чугунные валки; твердость

MULTIFRACTAL HARDNESS ANALYSIS OF ROLLER ROLLS

VOLCHUK V.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
DUBROV Yu.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of Materials Science and Materials Processing, 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

² Department of Materials Science and Materials Processing, 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: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Abstract. Formulation of the problem. In connection with the technology of production and operation to evaluate the mechanical properties of massive cast iron castings is not always possible with the use of field examinations. Therefore, the forecast of properties, in particular, rolling mill casting rolls, is carried out by means of simulation by analyzing the influence of the parameters of the technology. The parameters of the technology that influence the formation of the structure of cast-iron rolls include the chemical composition, the cooling rate, and the like. Since the structure of materials greatly affects their properties, but it is not always possible to quantitatively parameterize its elements using classical methods, in the work it is proposed to evaluate the quality of rolls on the basis of a multifractal analysis of the structure. **Materials and methods of research.** As a material for research, roller-bearings ЛПХ17НМдц-63, whose structure and properties were evaluated using the theory of multifractals, Shore hardness meter, metallographic analysis, mathematical modeling, were selected. It is noted that increasing the chromium content to 17 % in the white zone affects the formation of stable carbides and leads to an increase in hardness from 47 to 76 units of Shore compared with the gray zone. **Results and discussion.** The influence of the elements of the white zone structure of the roll barrel (from 0 to 50 mm from the surface). The relations between the most sensitive indicators in the spectrum of dimensions of the elements of the structure of the white zone are established: D_0 and D_{+100} by the dimensions of austenite; D_0 and $D_{.100}$ dimensions of chromium carbides and roller hardness indexes. The models for predicting the hardness of the working area of the rolls of ЛПХ17НМдц-63 rolls from the dimensions of austenite (correlation coefficients $R^2 = 0,71$ and $R^2 = 0,85$) and chromium carbides ($R^2 = 0,95$ and $R^2 = 0,89$). **Conclusions.** The results of the study indicate the expediency of applying a multifractal model of structure to the prediction of hardness parameters of the working area of roll barrels ЛПХ17НМдц-63.

Keywords: multifractal; structure; dimensional spectrum; cast iron rolls; hardness

Постановка задачі

Аналіз літературних джерел та штатної технології виробництва масивних металевих відливок, до яких відносяться листопркатні чавунні чавунні валки, свідчить про те, що вона являється складною у зв'язку з її багатопараметричністю та багатокритеріальністю [1–4]. Тому для ідентифікації подібних технологій застосовують системний підхід [5; 6], що об'єднує різні методики – натурні іспити, неруйнівні методи контролю, експертні оцінки, математичне моделювання та інші підходи [7–10].

Застосування математичних методів моделювання дозволяє отримувати оперативні оцінки по критеріям якості прокатних валків, або коригувати їх технологічні режими виробництва, минаючи значні матеріально-часові витрати [11; 12]. Та здебільшого їх застосовують для пошуку зв'язків між складом, структурою та властивостями валків [13–15]. Це, здебільшого, пов'язане з тим, що основними

характеристиками, які впливають на якість литих валків, є: хімічний склад, структура. На формування структури впливають технологічні параметри, включаючи, в першу чергу, умови охолодження та термічну обробку [1; 3].

Незважаючи на значну кількість існуючих моделей прогнозу характеристик якості листопркатних чавунних валків, слід зазначити, що більшість з них мають певні розбіжності, які можуть не задовольняти вимогам замовника. Відхилення показників прогнозу від даних експерименту можна пояснити з позицій багатofункціональності технології виробництва валків, коли навіть незначні відхилення, наприклад, по хімічному складу валків, можуть призвести до значного відхилення їх механічних властивостей [1; 3; 5].

В роботі запропоновано використати для оцінки структури та критеріїв якості листопркатних валків використати фрактальний підхід, що базується на проміжній асимптотіці [16–20]. Для оцінки структурних елементів маловуглецевих сталей

застосовують мультифрактальний підхід [21; 22]. В [23; 24] відмічається про успішне використання мультифрактального аналізу щодо прогнозу механічних властивостей сортопрокатних валків.

Матеріали і методики досліджень

Листопркатні (Л) чавунні валки з пластинчатою формою графіту (П) виконання ЛПХ17НМдц-63

мають поверхню робочого шару леговану хромом (Х) до 17 %, нікелем (Н) та молібденом (М). Це двошарові валки (д), виготовлені методом центробіжного лиття (ц) [1; 3].

Хімічний склад робочого шару (білої зони) та сірої зони листопркатного валку ЛПХ17НМдц-63 наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад валка, % від маси / The chemical composition of the roll, % of the mass

Бочка валку	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Mg
Біла зона (0 до 55)	2,75	1,08	0,94	0,039	0,033	16,5	1,32	1,24	0,058	0,049	–
Сіра зона (> 55 мм)	3,35	1,92	0,50	0,056	0,012	0,40	0,44	0,036	0,053	0,014	0,043

Валок не піддавався термічній обробці. Розміри бочки валку виконання ЛПХ17НМдц-63 наступні: діаметр 550 мм, довжина 1 500 мм.

Твердість бочки валку визначалася за методом Шора (ГОСТ 23273-78) на Дніпровському заводі

прокатних валків (табл. 2). При визначенні твердості валків контрольні заміри здійснювалися в трьох точках, що рівномірно розташовані по довжині низу бочки валку.

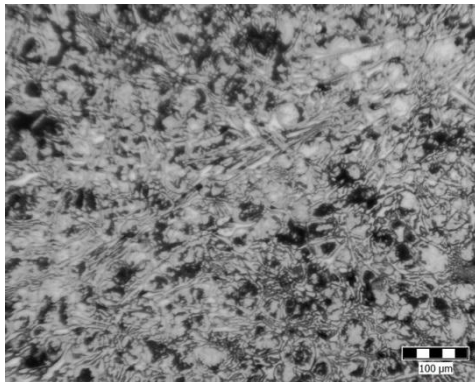
Таблиця 2

Твердість низу бочки валка, HSD (від чистового діаметру) / Hardness of the bottom of the barrel roller, HSD (from the working diameter)

Контрольні точки	Показники твердості
1	76/5-35мм, 74/45мм, 68/50мм, 58/55мм, 49/60мм, 47/65-75мм
2	76/5-35мм, 73/45мм, 69/50мм, 58/55мм, 51/60мм, 48/65-75мм
3	75/5-35мм, 74/45мм, 68/50мм, 57/55мм, 50/60мм, 47/65-75мм

Біла поверхнева зона бочки складається із аустенітної матриці з вclusions хромистих

карбідів на базі Cr_7C_3 (рис. 1 а), а сіра – з перлітної матриці та карбідів (цементиту 25,6 %) (рис. 1 б).



а (а)



б (б)

Рис. 1. Структура низу бочки валка: металева матриця білої зони (а), металева матриця сірої зони (б) / Fig. 1. Structure of the bottom of the barrel of the roll: the metal matrix of the white zone (а), the metal matrix of the gray zone (б)

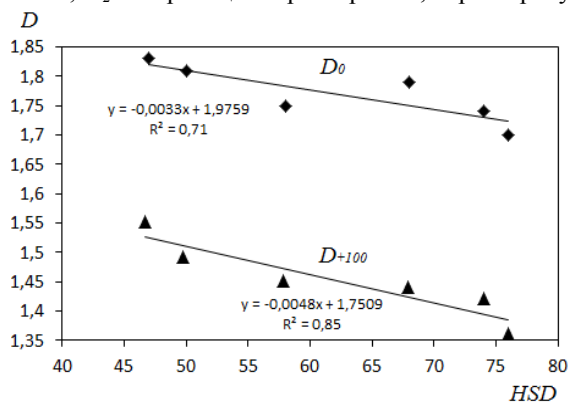
Робочу (білу) зону листопркатних чавунних валків виконання легують хромом (активним карбідоутворюючим елементом), який у валкових розплавах утворює стійкі карбіди, підвищує твердість і глибину вибіленого шару, але це призводить до збільшення глибини перехідної зони та зниження характеристик міцності, термічної стійкості прокатного валка [1; 3].

Результати та їх обговорення

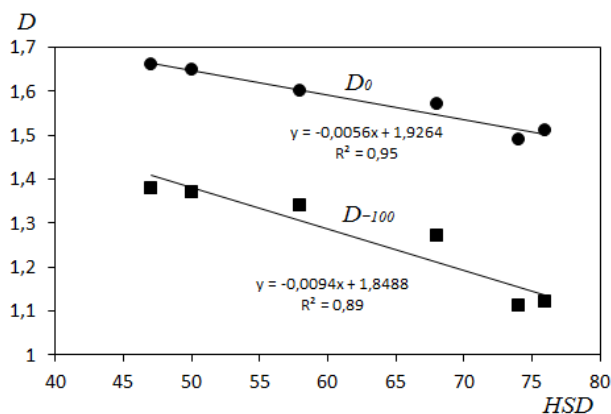
Спектр статистичних розмірностей мультифрактальної структури білої та сірої зони бочки валку ЛПХ17НМдц-63 визначався за формулою Реньї [25]:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta}, \quad (2)$$

де δ – розмір ячійки квадратної сітки, якою покривають об'єкт для обчислення розмірності; p_i – ймовірність попадання точки (пікселя для ЕОМ), що знаходиться на досліджуваному об'єкті, в i -ту ячійку квадратної сітки. Розмірності характеризують: D_0 – однорідний фрактал при $q = 0$ (фрактальна розмірність); D_I – інформаційна розмірність при $q = 1$ (інформаційна ентропія), що характеризує швидкість зростання кількості інформації і показує, як зростає інформація, необхідна для визначення місця розташування точки на об'єкті дослідження, при $\delta \rightarrow 0$; D_2 – кореляційна розмірність, характеризує



а (а)



б (б)

Рис. 2. Вплив розмірностей елементів структури білої зони на показники твердості чавунного валка: аустенітна матриця (а), карбіди хрому (б) / Fig. 2. Influence of the dimensions of the elements of the structure of the white zone on the indicators of hardness of the cast iron roll: austenitic matrix (a), carbide chromium (b)

Отримані результати можна пояснити не тільки позитивним впливом аустенітної матриці та карбідів хрому на твердість чавуну, але і впливом геометричної конфігурації та неоднорідності елементів структури, яка фіксується з використанням мультифрактального підходу.

Доцільність застосування мультифрактальної моделі до прогнозу твердості листопрокатних валків з аустенітною матрицею підтверджується отриманими моделями, оскільки виявлена чутливість показників твердості до розмірностей елементів структури білої зони: аустеніту та карбідів хрому.

Висновки

Запропоновано для оцінки структури та критеріїв якості листопрокатних чавунних валків застосовувати мультифрактальний підхід. Встановлені співвідношення між розмірностями білої зони структури (розмірностями аустеніту D_0 і D_{+100} та карбідів хрому D_0 і D_{-100}). Отримані моделі прогнозу показників твердості білої зони валків ЛПХ17НМдц-63 ($R^2 = 0,71 \dots 0,95$) в залежності від розмірностей елементів структури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кривошеев А. Е. Литые валки : монография / [А. Е. Кривошеев]. – Москва : Metallurgizdat, 1957. – 360 с.
2. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с. – Режим доступу : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
3. Прокатные валки из высокоуглеродистых сталей : монография / [Т. С. Скобло, Н. М. Воронцов, Н. А. Будагьянц и др.]. – Москва : Металлургия, 1994. – 336 с.
4. Большаков В. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2013. – № 4. – С. 5–11.
5. Большаков Вад. І. Системний аналіз технології виробництва масивного металевого лиття / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник НАН України. – 2015. – № 9. – С. 69–73. – Режим доступу : <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>

6. Большаков В. И. Этапы идентификации багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступу : <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/67873>
7. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
8. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступу : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>
9. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 3. – С. 21–25. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
10. Kroviakov S. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete / S. Kroviakov, A. Mishutin, O. Pishev // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7 – № 3.2. – Pp. 245–249.
11. Волчук В. Спосіб прогнозу механічних властивостей чавунних валків / В. Волчук, С. Токозов // Science Rise. – 2018. – Т. 11. – С. 57–61. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.150342>
12. Волчук В. М. Математична модель прогнозу якості металу / В. М. Волчук, М. С. Штанденко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2018. – № 2. – С. 31–35. – Режим доступу : <https://doi.org/10.30838/I.BPSACEA.2312.290818.31.87>
13. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 5. – С. 12–18. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
14. Большаков В. И. Прогнозирование и управление качественными характеристиками прокатных валков / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 9. – С. 9–14. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/42101>
15. Большаков В. И. Пути прогноза механических свойств прокатных валков / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2014. – № 1. – С. 19–40. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/19-40>
16. 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>
17. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
18. 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>
19. 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>
20. 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>
21. 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>
22. 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.
23. 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. – Pp. 93–97. – Режим доступу : <https://hrcak.srce.hr/202359>
24. Fractals and properties of materials: monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p. – Режим доступу : <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
25. Probability Theory : monograph / [A. Rényi]. – Amsterdam : North-Holland, 1970. – 670 p.
26. Волчук В. Н. Определение чувствительности мультифрактальных характеристик металла / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 12. – С. 10–14. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/58941>
27. 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 доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>

REFERENCES

- Krivosheev A.E. *Litye valki* [Cast rolls]. Moscow : Metallurgy, 1957, 360 p. (in Russian).
- 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).
- Skoblo T.S., Vorontsov N.M., Budagyants N.A. and others. *Prokatnyye valki iz vysokouglerodistykh staley* [Rolling rolls made of high-carbon steels]. Moscow : Metallurgiya, 1994, 336 p. (in Russian).

4. 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]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
5. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnyctva masyvnoho metalievoho lyt'tya* [System analysis techniques of producing solid metal castings]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 9, pp. 69–73. (in Ukrainian).
6. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Etapy identyfikatsiyi bahatoparametrychnykh tekhnolohiy ta shlyakhy yikh realizatsiyi* [Stages multiparameter identification technologies and ways of their implementation]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2013, no. 8, pp. 66–72. (in Ukrainian).
7. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovanii kachestva tselevogo produkta v periodicheskikh tekhnologiyakh* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 11, pp. 77–81. (in Russian).
8. 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. (in Russian).
9. Volchuk V.N. *K opredeleniyu oblasti kompromissa kharakteristik kachestva materialov* [By identifying areas compromise performance materials quality]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 21–25. (in Russian).
10. Kroviakov S., Mishutin A. and Pishev O. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, [S. 1.], vol. 7, no. 3.2, pp. 245.
11. Volchuk V. and Tokosov S. *Sposib prohnozu mekhanichnykh vlastyvostry chavunnykh valkiv* [Method of forecasting mechanical properties of cast-iron rolls]. *ScienceRise*, 2018, vol. 11, pp. 57–61. (in Ukrainian).
12. Volchuk V.M. and Shtandenko M.S. *Matematychna model prohnozu yakosti metalu* [Mathematical model of the metal quality forecast]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 2, pp. 31–35. (in Ukrainian).
13. Volchuk V.N. *Issledovaniya vliyaniya khimicheskogo sostava chugunnykh prokatnykh valkov na ikh mekhanicheskiye svoystva* [Studies of the influence of the chemical composition of cast iron rolls on their mechanical properties]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
14. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Prognozirovaniye i upravleniye kachestvennymi kharakteristikami prokatnykh valkov* [Prediction and control of quality characteristics rolls]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 9, pp. 9–14. (in Russian).
15. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Puti prognoza mekhanicheskikh svoystv prokatnykh valkov* [Ways to forecast the mechanical properties of the rolls]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 1, pp. 19–40. (in Russian).
16. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p.
17. Bol'shakov 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).
18. Bol'shakov 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).
19. 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).
20. 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).
21. 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).
22. 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 noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2011, vol. 33, no. 3, pp. 347–360. (in Russian).
23. 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.
24. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
25. Rényi A. *Probability Theory*. Amsterdam : North-Holland, 1970, 670 p.
26. 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).
27. Volchuk V.N. *K voprosu o primeneni 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).

Надійшла до редакції 03.08.2018, прийнята до друку 27.08.2018