

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.230419.13.287

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ СТАЛІ Ст3пс НА ТВЕРДІСТЬ

АКСАКОВ М. О., *магістр*

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: lpezka@gmail.com

Анотація. Постановка задачі. Використання непрямих методів контролю якості металопрокату обумовлено багатьма факторами, серед яких слід відзначити вплив хімічного складу, технологічних режимів. Ці фактори впливають на структуру та на механічні характеристики, зокрема, маловуглецевих сталей. В роботі для прогнозу показників твердості сталі Ст3пс запропоновано застосовувати методику планування експериментів з урахуванням впливу елементів хімічного складу та структури. Для оцінки ферито-перлітної структури запропоновано використовувати фрактальний формалізм, застосування якого дозволяє відстежувати зміни в структурі шляхом визначення фрактальної розмірності її елементів. **Матеріали та методика.** З використанням методики планування експериментів досліджувався вплив хімічного складу та структури на механічні властивості маловуглецевої низьколегованої сталі Ст3пс. **Результати.** Шляхом реалізації матриці планування експериментів отримана математична модель оцінки твердості сталі Ст3пс з урахуванням впливу елементів хімічного складу та фрактальної розмірності перліту. Модель адекватна згідно критеріям Кохрена та Фішера. На основі аналізу коефіцієнтів рівняння регресії побудована гістограма впливу елементів хімічного складу досліджуваної сталі на показники твердості. Зафіксовано зростання фрактальної розмірності перліту з 1,785 до 1,946 при збільшенні вмісту вуглецю від 0,14 до 0,22 %, що свідчить про можливість її використання при оцінці структури маловуглецевих сталей. **Висновки.** Розроблено спосіб оцінки твердості сталі Ст3пс з урахуванням впливу елементів хімічного складу та фрактальної розмірності перліту. Отримані результати свідчать про перспективи застосування теорії фракталів при прогнозі механічних властивостей маловуглецевих сталей.

Ключові слова: твердість; сталь; перліт; фрактал; матриця планування; модель

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ СТАЛИ Ст3пс НА ТВЕРДОСТЬ

АКСАКОВ Н. А., *магістр*

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: lpezka@gmail.com

Аннотация. Постановка задачи. Использование косвенных методов контроля качества металлопроката обусловлено многими факторами, среди которых следует отметить влияние химического состава, технологических режимов. Эти факторы влияют на структуру и на механические характеристики, в частности, малоуглеродистых сталей. В работе для прогноза показателей твердости стали Ст3пс предложено применять методику планирования экспериментов с учетом влияния элементов химического состава и структуры. Для оценки ферритно-перлитной структуры предложено использовать фрактальный формализм, применение которого позволяет отслеживать изменения в структуре путем определения фрактальной размерности ее элементов. **Материалы и методика.** С использованием методики планирования экспериментов исследовалось влияние химического состава и структуры на механические свойства малоуглеродистой низьколегованной стали Ст3пс. **Результаты.** Путем реализации матрицы планирования экспериментов получена математическая модель оценки твердости стали Ст3пс с учетом влияния элементов химического состава и фрактальной размерности перлита. Модель адекватна согласно критериям Кохрена и Фишера. На основе анализа коэффициентов уравнения регрессии построена гистограмма влияния элементов химического состава исследуемой стали на показатели твердости. Зафиксирован рост фрактальной размерности перлита с 1,785 до 1,946 при увеличении содержания углерода от 0,14 до 0,22 %, что свидетельствует о возможности ее использования при оценке структуры малоуглеродистых сталей. **Выводы.** Разработан способ оценки твердости стали Ст3пс с учетом влияния элементов химического состава и фрактальной размерности перлита. Полученные результаты свидетельствуют о перспективах применения теории фракталов при прогнозе механических свойств малоуглеродистых сталей.

Ключевые слова: твердость; сталь; перлит; фрактал; матрица планирования; модель

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF Ст3пс STEEL ON HARDNESS

AKSAKOV M.O., *Master of Engineering*

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: lpezka@gmail.com

Abstract. Formulation of the problem. The use of indirect methods of quality control of metal rolling is due to many factors, among which the influence of the chemical composition and technological regimes should be noted. These factors affect the structure and the mechanical characteristics, in particular, low carbon steels. In the work for the prediction of hardness indicators of Ст3пс steel, it is proposed to apply the methodology of planning experiments, taking into account the influence of elements of chemical composition and structure. To estimate the ferrite-pearlite structure, it is proposed to use the fractal formalism, the use of which allows you to track changes in the structure by determining the fractal dimension of its elements. **Materials and methods.** Using the methodology of planning experiments, the effect of the chemical composition and structure on the mechanical properties of low-carbon Ст3пс low-alloyed steel was investigated. **Results.** By implementing the experiment planning matrix, a mathematical model was obtained for evaluating the hardness of Ст3пс steel, taking into account the influence of elements of chemical composition and the fractal dimension of perlite. The model is adequate according to the criteria of Cochran's and Fisher. Based on the analysis of the coefficients of the regression equation, a histogram of the influence of the elements of the chemical composition of the studied steel on the hardness indicators was constructed. The growth of the fractal dimension of perlite from 1,785 to 1,946 with an increase in the carbon content from 0,14 to 0,22 % was recorded, which indicates the possibility of its use in assessing the structure of low-carbon steels. **Conclusions.** A method for assessing the hardness of Ст3пс steel has been developed, taking into account the influence of elements of chemical composition and fractal dimension of perlite. The results indicate the prospects for the application of the theory of fractals in the prediction of the mechanical properties of low-carbon steels.

Keywords: hardness; steel; perlite; fractal; matrix of planning; model

Постановка задачі

Для визначення фізичних, механічних, технологічних та інших властивостей металів застосовуються різні методи. Особливу увагу приділяють механічними характеристикам, оскільки вони багато в чому визначають придатність металопрокату до експлуатації [1]. Механічні властивості визначають шляхом натурних випробувань, а в деяких випадках замінять на непрямі методи. До цих випадків можна віднести масивні вироби з металу, або оперативний контроль металопрокату в процесі його виробництва [2–4]. До непрямих методів можна віднести математичні методи прогнозу матеріалів [5–8], ультразвукову діагностику [9], експертні оцінки [10] та ін.

Одними з перспективних методів прогнозу механічних властивостей матеріалів є методи

планування експериментів [11], що дозволяють досліджувати вплив хімічного складу та структури на властивості металу. Крім того, для оцінки структури успішно застосовується теорія фракталів [12–16].

В роботі для оцінки показників міцності запропоновано розглянуто спосіб оцінки твердості сталі Ст3пс на основі аналізу її хімічного складу та фрактальної розмірності елементів структури. Вибір даної марки сталі обумовлено тим, що з неї виготовляються несучі елементи зварних та незварних конструкцій, арматуру класу Ат400С.

Матеріали та методика

Сталь Ст3пс (арматура) досліджувалася в стані заводської поставки з наступним хімічним складом згідно ГОСТ 380-2005 (табл. 1).

Таблиця 1

Вміст елементів хімічного складу Ст3пс / Content of chemical elements of Ст3пс

Хімічний склад	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Вміст в %	0,14–0,22	0,05–0,15	0,40–0,65	до 0,30	до 0,05	до 0,04	до 0,30	до 0,30	до 0,08

Сталь Ст3пс мала ферито-перлітну структуру. Кількість перліту, в залежності від %-го вмісту вуглецю, коливалась в межах від 18 до 27 %. В структурі були виявлені окремі зерна бейніту (рис. 1).

Фрактальна розмірність структури визначалася за методикою [17], що базується на збіжності крапкового та клітинного методів (рис. 2).

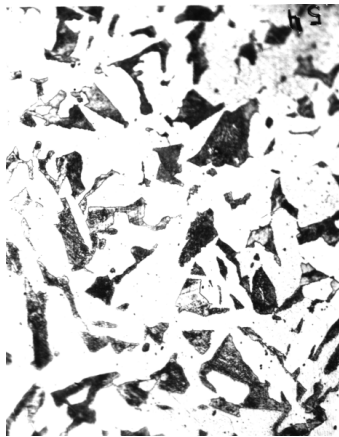


Рис. 1. Структура сталі Cm3nc, $\times 500$ / Fig. 1. Structure of steel Cm3nc, $\times 500$

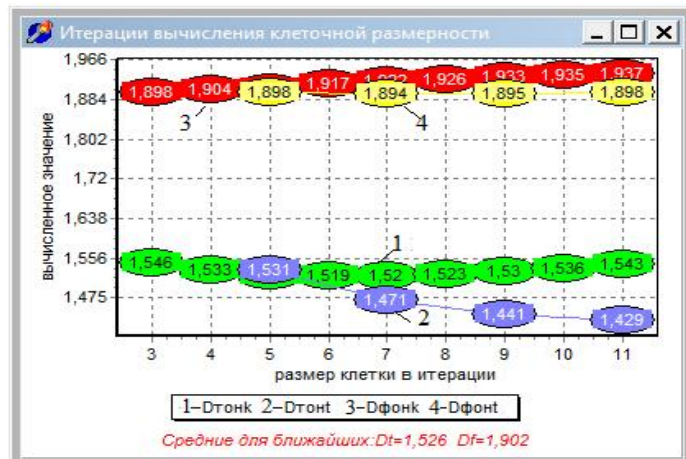


Рис. 2. Фрактальна розмірність Dt (перліту) і Df (фериту): 1 та 3 – клітинний метод, 2 та 4 – крапковий метод / Fig. 2. Fractal dimension Dt (perlite) and Df (ferrite): 1 and 3 – cell method, 2 and 4 – dot method

Такий підхід дозволяє збільшити точність визначення фрактальної розмірності елементів структури. Для розрахунків бралася до уваги фрактальна розмірність перліту, оскільки перліт має більшу твердість ніж ферит, тобто його вміст впливає на показники твердості.

Показники твердості HB сталі змінювалася в межах 125...135 одиниць.

Результати

Показники фрактальної розмірності перліту використовувалися в методиці планування експериментів разом з показниками хімічних елементів. Такий підхід дозволяє досліджувати динаміку зміни функції мети (твердості HB) в залежності від хімічного складу та фрактальної розмірності елементів структури. Матриця планування експериментів на 16 стовбців реалізовувалася з показниками функції мети $HB_{екс}$ та

оцінками її прогнозу $HB_{роз}$ (таблиця 2), де ЗР – загальний рівень значень аргументів ($X_1...X_{10}$); НР – нижній рівень; ВР – верхній рівень та ІВ – інтервал варіювання аргументів. Аргументами функції виступали вуглець (X_1), кремній (X_2), марганець (X_3), нікель (X_4), сірка (X_5), фосфор (X_6), хром (X_7), мідь (X_8), миш'як (X_9) та фрактальна розмірність перліту (X_{10}).

Шляхом реалізації матриці планування експерименту отримане рівняння:

$$Y_{роз} = 122,420 + 46,462 \cdot X_1 + 9,657 \cdot X_2 + 4,811 \cdot X_3 + 0,935 \cdot X_4 - 11,675 \cdot X_5 + 6,004 \cdot X_6 + 5,236 \cdot X_7 + 3,418 \cdot X_8 + 4,993 \cdot X_9 + 2,316 \cdot X_{10}$$

На гістограмі (рис. 2) наведені чисельні значення впливу кожного з елементів хімічного складу та фрактальної розмірності перліту на показники твердості, що отримані шляхом нормування коефіцієнтів рівняння регресії.

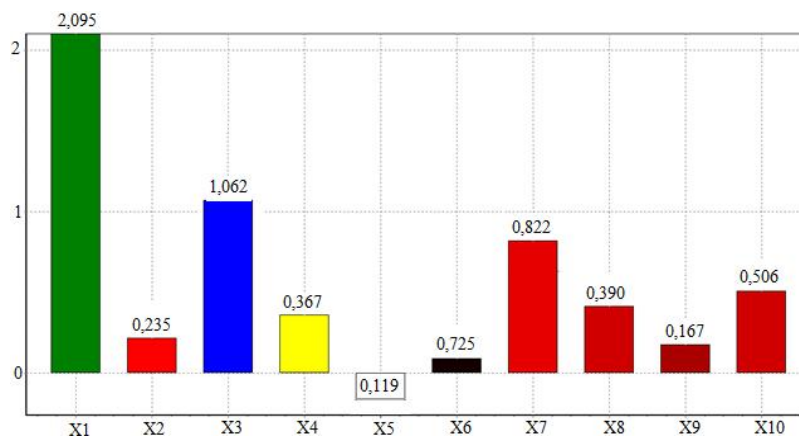


Рис. 2. Гістограма впливу змінних на функцію мети / Fig. 2. Histogram of the influence of variables on the function of purpose

Матриця планування експериментів для сталі Ст3пс / Experiment Planning Matrix for Steel Ст3пс

ЗР		0,180	0,050	0,525	0,150	0,035	0,025	0,200	0,150	0,050	1,866	Твердість, НВ	
ІВ		0,040	0,100	0,125	0,150	0,015	0,015	0,100	0,150	0,030	0,081		
ВР		0,140	0,150	0,650	0,300	0,050	0,040	0,300	0,300	0,080	1,946		
НР		0,220	0,050	0,400	0,000	0,020	0,010	0,100	0,000	0,020	1,785		
№	X ₀	X ₁ (C)	X ₂ (Si)	X ₃ (Mn)	X ₄ (Ni)	X ₅ (S)	X ₆ (P)	X ₇ (Cr)	X ₈ (Cu)	X ₉ (As)	X ₁₀ (D)	Y _{екс}	Y _{роз}
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	135,0	141,1
2	+	+	+	+		+	+	+	-	-	+	134,0	137,5
3	+	+	+	-		+	-	-	+	+	-	133,0	131,2
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	132,0	130,1
5	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	130,0	134,6
6	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	134,8	139,3
7	+	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	129,5	121,6
8	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	129,8	1,269
9	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	129,0	128,8
10	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	128,2	122,4
11	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	128,4	128,1
12	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	127,0	126,4
13	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	126,5	120,2
14	+	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	126,6	119,3
15	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	125,0	124,7
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	125,8	129,4

Найбільший зв'язок спостерігається між функцією мети та аргументами: вуглець – 2,095, марганець – 1,062 та хром – 0,822. Сірка знижує твердість сталі, оскільки при підвищених температурах робить її красноламною та холодноламною відповідно. Зв'язок між хімічним складом сталі Ст3пс та її твердістю обґрунтовується фізико-хімічною інтерпретацією їх впливу. Зафіксовано незначний вплив Si (0,235), Ni (0,367), Cu (0,390) та As (0,167) на твердість сталі Ст3пс. Ці хімічні елементи по своєму призначенню можуть більш впливати на інші службові характеристики.

Для перевірки на адекватність модель перевіряли за критеріями Фішера та Кохрена. Згідно критерію Фішера модель адекватна:

$$F_{\text{спостережень}} = 1,834; F_{\text{критич}} = 2,400.$$

Згідно критерію Кохрена модель також адекватна:
 $F_{\text{спостережень}} = 0,429; F_{\text{критич}} = 0,547.$

Висновки

В роботі проведені дослідження впливу хімічного складу та фрактальної розмірності перліту на твердість сталі Ст3пс з ферито-перлітною структурою. Шляхом реалізації матриці планування експериментів отримана регресійна модель прогнозу твердості. Крім впливу хімічного складу на твердість сталі Ст3пс встановлено чутливість твердості до зміни фрактальної розмірності перліту, що дозволяє застосовувати даний підхід при оцінці впливу структури на показники міцності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прокатные валки из высокоуглеродистых сталей : монография / [Т. С. Скобло, Н. М. Воронцов, Н. А. Будагянц и др.]. – Москва : Металлургия, 1994. – 336 с.

2. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с.
3. 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.
4. Большаков В. И. Этапы идентификації 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>
5. 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>
6. Kroviakov S. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures / S. Kroviakov, A. Mishutn // *The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanya*. – 2017. – Vol. 1. – № 4. – Pp. 2–10.
7. Большаков В. И. К вопросу о постановке задачи идентификации фрактальной структуры металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – 2016. – № 5. – С. 35–39. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/68905/63995>
8. 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>
9. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов : монография / [А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов]. – Киев : Техника, 1972. – 460 с.
10. 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>
11. Большаков В. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Л. Н. Дейнеко, Ю. И. Дубров // *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества : матер. к 45-му междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. – Одесса : АстроПринт, 2006. – С. 146–150.
12. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
13. *Fractals and properties of materials : monograph* / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p.
14. 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://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
15. 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>
16. 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>
17. 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.

REFERENCES

1. 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 Publ., 1994, 336 p. (in Russian).
2. 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).
3. 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]. *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4. pp. 5–11. (in Russian).
4. 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).
5. 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.
6. Kroviakov S. and Mishutn A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. *The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanya*. 2017, vol. 1, no. 4, pp. 2–10.
7. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K voprosu o postanovke zadachi identifikatsii fraktal'noy struktury metalla* [Statement on the issue of the problem identification of fractal metal structures]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5, pp. 35–39. (in Russian).
8. 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).

9. Gurvich A.K. and Ermolov I.N. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya svarnykh shvov* [Ultrasonic testing of welds]. Kyiv : Tekhnika, 1972, 460 p. (in Russian).
10. 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).
11. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Dubrov Yu.I. and Deyneko L.N. *Formirovanie modeli prognoza kachestva materiala, osnovannoj na `ekspertnoj ocenke i aktivnom `eksperimente* [Formation of a model for predicting the quality of a material based on expert judgment and an active experiment]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie kachestva : mater. k 45-mu mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [Computer Science and Quality Assurance : mater. to the 45th Intern. Sem. on modeling and optimization of composites]. Odessa : AstroPrint, 2006, pp. 146–150. (in Russian).
12. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fundamentals of fractal modeling*. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).
13. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
14. 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.
15. 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).
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.
17. 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).

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 11.04.19.

Прийнята до друку 15.04.19.