

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040719.29.460

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТВЕРДОСТІ СТАЛІ Р6М5

КАЧУР В. І., бакалавр

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: Spbdnepr@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3179-1928

Анотація. Вступ. Оцінювання критеріїв якості інструментальної швидкохідної сталі Р6М5 неруйнівними методами – актуальне завдання. Це пов'язано з тим, що інструменти з неї використовуються для роботи на різальних, шліфувальних, свердлильних верстатах, оскільки провести натурні іспити на таких деталях не завжди технічно можливо. У статті запропоновано методіку оцінювання показників твердості сталі із застосуванням математичного моделювання. **Матеріали та методика.** Досліджувався вплив елементів хімічного складу сталі Р6М5 на показники твердості із застосуванням методіки планування експериментів. Хімічний склад сталі змінювався згідно з прийнятими нормативними документами (ГОСТ 19265). **Результати експерименту.** Досліджувались робоча область вибраних параметрів (показників елементів хімічного складу) та функції мети (твердості). Діапазон числових значень параметрів робочої зони обмежувався граничними значеннями показників хімічного складу сталі Р6М5. Для побудови матриці планування експериментів обиралися лише ті рядки, по яких була відома інформація про показники твердості з літературних джерел або на основі аналізу експертної інформації. В процесі реалізації матриці планування експериментів отримано регресійну модель оцінювання показників твердості сталі Р6М5 залежно від її хімічного складу. Модель адекватна згідно з критеріями Фішера ($F = 1,002$) та Кохрена ($F = 0,336$). На основі аналізу моделі побудовано гістограму впливу елементів хімічного складу на показники твердості, що підтверджується їх фізико-хімічною взаємодією. Встановлено, що найбільше впливають на твердість сталі Р6М5 вуглець (1,050), хром (0,550) та вольфрам (0,275). **Висновки.** Для сталі Р6М5 шляхом методіки планування експериментів отримано модель прогнозу показників твердості залежно від хімічного складу, що сприяє економії матеріально-часових витрат на натурні іспити.

Ключові слова: сталь Р6М5; матриця планування; хімічний склад; математична модель; твердість

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТВЕРДОСТИ СТАЛИ Р6М5

КАЧУР В. И., бакалавр

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: Spbdnepr@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3179-1928

Аннотация. Введение. Оценка критериев качества инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 неразрушающими методами представляет собой актуальную задачу. Инструменты из нее используются для работы на режущих, шлифовальных, сверлильных станках. Провести натурные испытания на таких деталях не всегда технически возможно. В работе предложена методика оценки показателей твердости стали с применением математического моделирования. **Материалы и методика.** Исследовалось влияние элементов химического состава стали Р6М5 на показатели твердости с использованием методіки планирования экспериментов. Химический состав стали менялся согласно принятым нормативным документам (ГОСТ 19265). **Результаты эксперимента.** Исследовалась рабочая область выбранных параметров (показателей элементов химического состава) и функции цели (твердости). Диапазон численных значений параметров рабочей зоны ограничивался предельными значениями показателей химического состава стали Р6М5. Для построения матрицы планирования экспериментов избирались только те строки, по которым была известна информация о показателях твердости из литературных источников или на основе анализа экспертной информации. В процессе реализации матрицы планирования экспериментов получена регрессионная модель оценки показателей твердости стали Р6М5 в зависимости от ее химического состава. Модель адекватна согласно критериям Фишера ($F = 1,002$) и Кохрена ($F = 0,336$). На основе анализа модели построена гистограмма влияния элементов химического состава на показатели твердости, что подтверждается их физико-химическим взаимодействием. Установлено, что наибольшее влияние на твердость стали Р6М5 оказывают углерод (1,050), хром (0,550) и вольфрам (0,275). **Выводы.** Для стали Р6М5 путем методіки планирования экспериментов получена модель прогноза показателей твердости в зависимости от химического состава, что приводит к экономии материально-временных затрат на натурные испытания.

Ключевые слова: сталь Р6М5; матрица планирования; химический состав; математическая модель; твердость

MATHEMATICAL MODEL FOR HARDNESS TEST FOR STEEL R6M5

KACHUR V.I., *Bachelor*

Department of Materials Science and Material Processing, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, phone: +38 (0562) 47-39-56, e-mail: Spbdnepr@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3179-1928

Abstract. Introduction. The evaluation of the quality criteria of the instrumental quick-cutting steel R6M5 by non-destructive methods is an urgent task. This is due to the fact that tools made from it are used to work on cutting, grinding, drilling machines, since it is not always technically possible to carry out full-scale tests on such parts. The paper proposes a method for evaluating the hardness of steel with the use of mathematical modelling. **Materials and methods.** In this work the influence of elements of the chemical composition of steel R6M5 on the hardness indexes was investigated using the method of experiment planning. The chemical composition of the steel changed in accordance with accepted regulatory documents (GOST 19265). **Experiment results.** The working area of the selected parameters (indicators of elements of chemical composition) and the objective function (hardness) were investigated. The range of numerical values of the parameters of the working area was limited to the limiting values of the indicators of the chemical composition of steel R6M5. To build the planning matrix of experiments, only those lines were selected for which information on hardness indicators was known from literary sources or based on the analysis of expert information. In the process of implementation of the matrix of experimental planning, a regression model for evaluating the hardness values of steel R6M5, depending on its chemical composition, was obtained. The model is adequate according to Fisher criteria ($F = 1,002$) and Kochren ($F = 0,336$). Based on the analysis of the model, the histogram of the influence of the elements of the chemical composition on the hardness indexes is constructed, which is confirmed by their physicochemical interaction. It was found that the greatest influence on the hardness of steel R6M5 is given by carbon (1,050), chromium (0,550) and tungsten (0,275). **Conclusions.** For steel R6M5 by the method of planning of experiments the model of the prediction of hardness parameters depending on the chemical composition is obtained, which leads to save the material and time costs for natural tests.

Keywords: *steel R6M5; matrix of planning; chemical composition; mathematical model; hardness*

Вступ. Твердість металу – одна з його основних механічних та експлуатаційних характеристик. Оцінювання показників твердості різних матеріалів проводиться за допомогою традиційних методик вдавлення інденторів різної форми залежно від їх складу та будови (структури) [1; 2]. Однак прогноз показників твердості металу, як і інших його критеріїв якості, на основі аналізу фазового і хімічного складу або структури залишається актуальним завданням металознавства, оскільки він допомагає виявляти та ранжувати по їх значимості параметри, які найбільше впливають на цю характеристику [3–5].

Для визначення показників якості сталей та чавунів, включаючи твердість, застосовують також математичне моделювання [6–8], фрактальний підхід [9–12] і [13; 14] для оцінювання якості чавунів застосовують системний підхід;

експертні оцінки [15; 16]; регресійний аналіз [17; 18]. Для цієї мети успішно користуються методикою планування експериментів [19–22]. Вона дозволяє з мінімальними матеріальними та часовими витратами на проведення натурних іспитів визначити найбільш впливові характеристики на функцію мети.

Для оцінювання показників твердості інструментальної швидкорізальної сталі Р6М5 запропоновано застосувати методику планування експериментів із використанням статистичної інформації та експертних оцінок. Інструменти зі сталі Р6М5 мають відповідальне призначення і широко застосовуються для різальних, шліфувальних і свердлильних верстатів та іншого обладнання.

Матеріали та методика. Сталь Р6М5 досліджувалася в стані заводської поставки (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад сталі Р6М5 / Chemical composition of steel Р6М5

Вміст (мас. част.,%)	C	Cr	W	V	Mo
Р6М5	0,80...0,88	3,80...4,40	5,50...6,50	1,70...2,10	5,00...5,50

Показники твердості сталі змінювалися від 63 до 65 HRC згідно зі штатною технологією.

Результати експерименту. Для оцінювання твердості застосовувалася методика планування експериментів, що дозволяє отримувати інформацію про зміни показників функції найменшою кількістю дослідів. Використовувався дворівневий експеримент (-1 та +1) в матриці на 16 рядків, де кожний рядок матриці описує окремо проведений експеримент (табл. 2).

Обчислювалися значення функції, отримані експериментально $Y_{екс}$ та за допомогою отриманого рівняння регресії $Y_{роз}$, наведені в таблиці 2. Тут значення ЗР означає загальний рівень показників аргументів ($X_1...X_5$); НР та ВР – нижній та верхній рівні аргументів відповідно й ІВ – інтервал варіювання $X_1...X_5$. Аргументами функції мети (твердості) виступали такі параметри: вуглець (X_1), хром (X_2), вольфрам (X_3), ванадій (X_4) та молібден (X_5).

Таблиця 2

Матриця планування експериментів для сталі Р6М5 / Experiment planning matrix for steel Р6М5

ЗР		0,84	4,10	6,00	1,90	5,25	Показники твердості, HRC	
ІВ		0,04	0,30	0,50	0,20	0,25		
ВР		0,88	4,40	6,50	2,10	5,50		
НР		0,80	3,80	5,50	1,70	5,00		
№	X_0	X_1 (C)	X_2 (Cr)	X_3 (W)	X_4 (V)	X_5 (Mo)	$Y_{екс}$	$Y_{роз}$
1	+	+	+	+	+	+	65,0	65,1
2	+	+	+	+	-	+	64,9	64,9
3	+	+	+	-	+	+	64,8	64,8
4	+	+	+	-	-	+	64,7	64,7
5	+	+	-	+	+	-	64,6	64,5
6	+	+	-	+	-	-	64,5	64,4
7	+	+	-	-	+	-	64,3	64,8
8	+	+	-	-	-	-	64,2	64,1
9	+	-	+	+	+	-	64,1	64,0
10	+	-	+	+	-	-	64,0	63,9
11	+	-	+	-	+	-	63,8	63,8
12	+	-	+	-	-	-	63,7	63,6
13	+	-	-	+	+	+	63,5	63,5
14	+	-	-	+	-	+	63,3	63,4
15	+	-	-	-	+	+	63,2	63,2
16	+	-	-	-	-	+	63,0	63,1

У результаті реалізації матриці планування експерименту отримано математичну модель оцінювання твердості

сталі Р6М5 залежно від впливу елементів її хімічного складу:

$$Y_{\text{роз}} = 64,100 + 0,525 \cdot X_1 + 0,275 \cdot X_2 + 0,137 \cdot X_3 + 3 + 0,062 \cdot X_4 + 0,050 \cdot X_5.$$

Аналіз коефіцієнтів рівняння дозволив визначити вагу впливу кожного з елементів хімічного складу на показники твердості HRC та провести їх ранжування шляхом нормування коефіцієнтів (див. рисунок).

З гістограми, наведеної на рисунку випливає, що найбільше впливають на функцію мети x_1 (вуглець), x_2 (хром) та x_3 (вольфрам). Більша частина зв'язаного вуглецю у сталі Р6М5, що міститься у вигляді цементиту Fe_3C (карбід заліза). Збільшення кількості вуглецю в сталі до 1,2 % сприяє зростанню показників міцності, включаючи показники твердості, але при цьому знижує показники в'язкості,

здатність до зварювання. Підвищення відсоткової кількості хрому позитивно впливає на показники міцності, загартованості і жаростійкості, різальні та трибологічні властивості, але негативно – на показники в'язкості та теплопровідності сталі.

Вольфрам завдяки утворенню карбідів підвищує показники твердості, червоностійкості та опір сталі до корозії і зносостійкості [1].

Атоми ванадію служать додатковими центрами кристалізації, що зумовлює отримання сталі з дрібнозернистою структурою. Тому V поліпшує показники твердості та міцності металу. Легування сталі молібденом також поліпшує характеристики міцності і твердості та інші службові характеристики сталей різних марок [1].

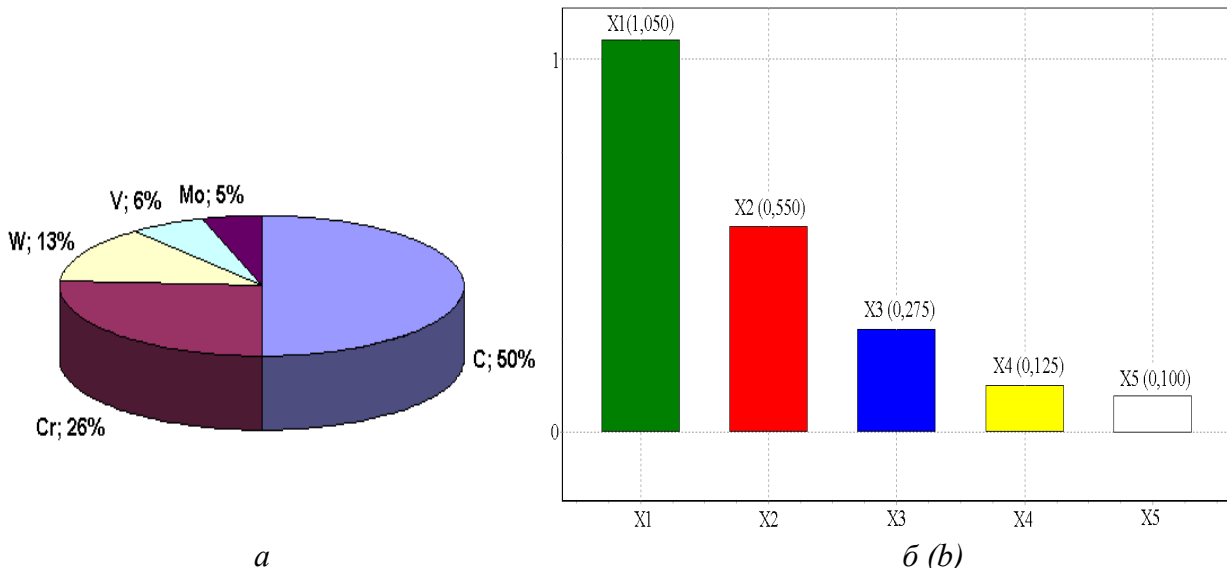


Рис. Гістограма впливу елементів хімічного складу сталі Р6М5 на твердість

a – показники в % відношенні; *b* – нормовані показники / Fig. Histogram of the influence of elements of the chemical composition of steel P6M5 on hardness: *a* – indicators in % relative; *b* – normalized indicators

За допомогою методів статистики отриману модель перевіряли на адекватність та збіжність результатів із використанням критеріїв Фішера та Кохрена. Результати свідчать про роботоспроможність моделі:

– критерій Фішера $F_{\text{спостережень}} = 1,003$ за критичного значення 2,400;

– критерій Кохрена $F_{\text{спостережень}} = 0,336$ за критичного значення 0,547.

Висновки. Розроблено математичну модель оцінювання показників твердості

інструментальної швидкорізальної сталі Р6М5. Адекватність моделі підтверджується критеріями Фішера та Кохрена, що дозволяє використовувати модель для коригування хімічного складу інструментів, що виготовляються з досліджуваної марки сталі, та отримання їх необхідних показників твердості залежно від вимог нормативних документів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гуляев А. П. *Металловедение : монография / А. П. Гуляев.* – Москва : Металлургия, 1986. – 542 с.
2. Большаков В. И. *Субструктурное упрочнение конструкционных сталей : монография / В. И. Большаков.* – Торонто : Базилиан Пресс, 1998. – 316 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. Волчук В. М. Ранжування елементів хімічного складу металу / В. М. Волчук, О. Р. Живиця // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – 2018. № 3. – С. 36–41. – Режим доступу : <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250918.36.194>
5. 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>.
6. 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>
7. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2018. – Vol. 40, № 9. – Pp. 1165–1171. – Режим доступу : DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165
8. Большаков В. И. К определению метрики объекта идентификации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2016. – № 4. – С. 10–14. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/10-14/85306>
9. 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>
10. 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://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/130334>
11. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика, 2017. – 170 с.
12. 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>
13. 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>
14. 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>
15. 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>
16. Пути индентификации 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>
17. 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.
18. 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>
19. 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>
20. 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.
21. Дубров Ю. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении / Ю. И. Дубров, В. Н. Волчук, В. И. Большаков // *Моделирование и оптимизация в*

материаловедении : матер. к 40-му междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса : АстроПринт, 2001. – С. 25–26.

22. Большаков В. И. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества материалов / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Л. Н. Дейнеко, Ю. И. Дубров // Перспективные задачи инженерной науки. – Вып. 2. – Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001. – С. 203–208.

REFERENCES

1. Gulyayev A.P. *Metallovedeniye* [Metallography]. Moscow : Metallurgy Publ., 1986, 542 p. (in Russian).
2. Bolshakov V. I. *Substrukturnoye uprochneniye konstruksionnykh staley* [Substructural strengthening of structural steels]. Toronto : Bazilian Press Publ., 1998, 316 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]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no 4., pp. 5–11. (in Russian).
4. Volchuk V.M. and Zhivitsa O.R. *Ranzhuvannya elementiv khimichnoho skladu metalu* [Ranking of elements of chemical composition of metal]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 3, pp. 36–41. (in Ukrainian).
5. Volchuk V.M. *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 Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
6. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii imitatsionnogo modelirovaniya v materialovedenii* [The application simulated modelling in materials science]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 4. pp. 26–31. (in Russian).
7. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii* [Metal Physics and Newest Technologies]. 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1165–1171.
8. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu metriki ob"yektov identifikatsii* [To the definition of the identity metric]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 4, pp. 10–14. (in Russian).
9. 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.
10. 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 noveyshie tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).
11. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizatsii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kyiv : Akademperiodika, 2017, 170 p. (in Russian).
12. Volchuk V.N. *K voprosu o primenenii teorii mul'tifraktalov dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv metalla* [On the application of the theory of multifractals for the evaluation of the mechanical properties of a metal]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
13. 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).
14. Bolshakov V.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva masyvnogo metalevoho lyttya* [System analysis techniques of producing solid metal castings]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 9, pp. 69–73. (in Ukrainian).
15. Volchuk V.M. *K opredeleniyu oblasti kompromissa kharakteristik kachestva materialov* [By identifying areas compromise performance materials quality]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 21–25. (in Russian).
16. 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).
17. 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).
18. 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's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
 19. 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.
 20. Kroviakov S. and Mishutn A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. *The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanyia*. 2017, vol. 1, no. 4, pp. 2–10.
 21. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bolshakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovanii aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. *Modelirovanie i optimizaciya v materialovedenii : materialy 40-go mezhdunarodnogo seminara po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [Modeling and optimization in materials science : mater. of the 40th Intern. Workshop on modeling and optimization of composites]. 2001, pp. 25–26. (in Russian).
 22. Bolshakov V.I., Volchuk V.N., Deyneko L.N. and Dubrov Yu.I. *Kompozitsiya metoda planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov i ekspertnoy informatsii dlya formirovaniya sistemy prognoza kachestva materialov* [Composition of a method for planning extreme experiments and expert information for the formation of a material quality prediction system]. *Perspektivnyye zadachi inzhenernoy nauki* [Perspective tasks of engineering science]. Dnepropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, iss. 2, pp. 203–208. (in Russian).

Надійшла до редакції: 10.05.2019 р.