

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.281221.64.825

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ ЧАВУННИХ ВАЛКІВ ВИКОНАННЯ ЛПХ17НМдц

МОСЬПАН А. В., *бакалавр*Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: angelinamospan@gmail.com

Анотація. Вступ. Технологія виготовлення листопрокатних валків належить до складних. На формування їх робочого шару впливає багато параметрів, зумовлених штатною технологією виготовлення. Від цього багато в чому залежать службові властивості валків та якість металопрокату, що випускається. Для поліпшення властивостей валків та зняття до мінімуму залишкових напруг застосовують термічну обробку (відпал). Тому дослідження впливу термічної обробки на показники якості чавунних листопрокатних валків із використанням неруйнівних способів – актуальне завдання металургійної галузі. **Матеріали та методика.** Досліджувався вплив термічної обробки на показники твердості чавунних валків виконання ЛПХ17НМдц в робочому шарі (від 0 до 160 мм). Показники твердості в робочому шарі валків до термічної обробки змінювалися в межах від 47 до 49 HSD. Після термічної обробки показники твердості істотно збільшилися та змінювалися в межах від 72 до 75 HSD, що відповідає вимогам ТУ У 14-2-1188-97. Металічна матриця нижнього тріфу валка до термічної обробки складалася з перліту чавуну, мікролегованого хромом та нікелем, складається з перліту (81...85 %), цементиту (12...16 %), кулястого графіту (2...3 %). Після термічної обробки структура низу бочки валка була така: хромисті карбіди + сорбіт відпуску + аустеніт ~ 7 %. **Результати експерименту.** На початковій стадії досліджень із застосуванням експертної оцінки проводився аналіз впливу хімічного складу валків на їх механічні властивості із застосуванням розробленого авторського програмного продукту (Ю. І. Дубров, В. М. Волчук, Ф. В. Криулін). Це важливий етап досліджень, оскільки від розмірів валків та їх хімічного складу багато в чому залежить вибір режимів термічної обробки. Шляхом співставлення значень твердості в реперних точках робочого шару бочки валка та відстані від поверхні бочки отримані математичні моделі. Математичні моделі описують вплив термічної обробки на показники твердості робочого шару та мають задовільні коефіцієнти кореляції $R^2 = 0,72$ (до термічної обробки) і $R^2 = 0,87$ (після термічної обробки). **Висновки.** Досліджено зміну твердості валків у робочому шарі до та після термічної обробки, що описується математичними моделями з використанням експертних оцінок.

Ключові слова: валки ЛПХ17НМдц; хімічний склад; твердість; термічна обробка; карбіди; модель

MATHEMATICAL MODELING OF HARDNESS OF CAST IRON ROLLS PERFORMANCE ЛПХ17НМдц

MOSPAN A.V., *bachelor*Department of Materials Science and Treatment of Materials, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (0562) 47-39-56, e-mail: angelinamospan@gmail.com

Abstract. Introduction. The technology of manufacturing sheet rolls is complex. The formation of their working layer is influenced by many parameters due to the standard technology of their manufacture. The service properties of rolls and quality of rolled metal largely depend on it. Heat treatment (annealing) is used to improve the properties of the rolls and to minimize residual stresses. Therefore, the study of the impact of heat treatment on the quality of cast iron sheet rolls using non-destructive methods is an urgent task of the metallurgical industry. **Materials and methods.** The influence of heat treatment on the hardness of cast iron rolls of ЛПХ17НМдц in the working layer (from 0 to 160 mm) was studied. The hardness values in the working layer of the rolls before heat treatment ranged from 47 to 49 HSD. After heat treatment, the hardness values increased significantly and varied from 72 to 75 HSD, which meets the requirements of ТУ У 14-2-1188-97. The metal matrix of the lower treph of the roll before heat treatment consisted of perlite cast iron microalloyed with chromium and nickel, consisting of perlite (81... 85 %), cementite (12...16 %), spherical graphite (2...3 %). After heat treatment, the structure of the bottom of the roll barrel was as follows: Chromium carbides + sorbitol tempering + Austenite ~ 7 %. **The results of the experiment.** At the initial stage of research with the use of expert evaluation, the analysis of the influence of the chemical composition of the rolls on their mechanical properties was performed using the developed author's software product (Yu.I. Dubrov, V.M. Volchuk,

F.V. Kriulin). This is an important stage of research, because the size of the rolls and their chemical composition largely depends on the choice of heat treatment modes. Mathematical models are obtained by comparing the values of hardness at the reference points of the working layer of the roll barrel and the distance from the barrel surface. Mathematical models describe the effect of heat treatment on the hardness of the working layer and have satisfactory correlation coefficients $R^2 = 0,72$ (before heat treatment) and $R^2 = 0,87$ (after heat treatment). **Conclusions.** The change in the hardness of the rolls in the working layer before and after heat treatment, which is described by mathematical models using expert estimates, has been studied.

Keywords: rolls ЛПХ17НМдц; chemical composition; hardness; heat treatment; carbides; model

Вступ. До виробів важкої промисловості належать масивні металеві відливки, зокрема прокатні валки, маса яких може змінюватись від 50 до 15 000 кг. Для поліпшення механічних характеристик чавунних валків та зняття залишкових напруг застосовують термічну обробку [1; 2], що може займати 2–4 доби залежно від їх розмірів. У більшості випадків це багатоступінчастий відпал. Вибір режимів термічної обробки залежить від маси виробу, його хімічного складу та інших характеристик [3; 4]. У свою чергу, механічні характеристики чавунних валків визначають будова [5; 6] та їх хімічний склад [7–12].

Для ідентифікації та оптимізації технології виробництва масивних відливок із чавуну та сталі [13; 14] часто використовують емпірико-статистичні методи [15–18]. В основному вони базуються на застосуванні регресійних моделей [19–25] та імітаційного моделювання [26]. Широкого розповсюдження набуло застосування мульти- [27; 28] та монофрактальних [29; 30] оцінок елементів структури металевих виробів у зв'язку з їх складною геометричною будовою. Із застосуванням фрактальних підходів проводиться також і реєстрація структурних змін валкового чавуну внаслідок термічної обробки, коригування їх хімічного складу, параметрів технології [31–36].

Важливою складовою у побудові математичних моделей оперативної оцінки та прогнозу властивостей різних матеріалів стає застосування експертних даних [37; 38], що може суттєво відобразитися на точності та адекватності тієї чи іншої моделі [39–41].

У наведеній статті містяться результати дослідження впливу термічної обробки (треступінчастого відпалу за штатною технологією виробництва) на твердість робочого шару двошарових чавунних валків виконання ЛПХ17НМдц із застосуванням експертних оцінок та регресійного моделювання.

Матеріали та методика. Чавунні валки виконання ЛПХ17НМдц належать згідно з нормативними документами до листопрокатних (Л), до структури яких входять графітні пластинчасті включення (П), робоча поверхня бочок валків легована хромом (Х) та нікелем (Н).

У таблиці 1 наведено хімічний склад робочої зони валкового чавуну виконання ЛПХ17НМдц.

Таблиця 1

Хімічний склад валків ЛПХ17НМдц в (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
2,63...3,00	0,8...0,9	1,1... 1,2	0,047... 0,057	0,02...0,03	16...17	1,3...1,4	1,2...1,3	0,08...0,09

Таблиця 2

Твердість валків ЛПХ17НМдц

Т/О	Плавка 21218		Плавка 21608	
	№ зразка	Твердість робочої поверхні, HSD	№ зразка	Твердість робочої поверхні, HSD
до т/о	1	48	1	49
після т/о	2	75	2	74

Геометричні розміри двох досліджуваних чавунних валків виконання ЛПХ17НМдц – 510×1 680 мм.

Твердість чавунних валків досліджувалася за методикою Шора

відповідно до Держстандарту 23273-78. Листопркатні валки виготовлялися на Дніпровському заводі прокатних валків. Показники твердості за допомогою переносного склероскопа Шора визначали до та після технологічної операції термічної обробки валків у трьох рівновіддалених точках, розташованих по всій довжині бочки валка. Експериментальні значення твердості чавуну наведено в таблиці 2.

Для металографічного аналізу відбирали зразки зі сколів бочок двох досліджуваних валків до та після процедури травлення згідно з Держстандарту 3443-87. Хімічний склад чавуну визначали за допомогою спектрального аналізу зі сколів бочок.

Зі сколів бочок виготовляли зразки для оптичного аналізу, які для виявлення структурних елементів проходили стандартні технологічні операції:

- 1) шліфування;
- 2) полірування;
- 3) травлення.

Дослідження структури здійснювали за допомогою оптичного мікроскопа Епівант. Для фотозйомки структури застосовували апарат Olympus C-50.

На рисунку 1 наведено мікроструктуру робочого шару валкового чавуну виконання ЛПХ17НМдц до термічної обробки (*а, б*) та після неї (*в, г*) за збільшення 100.

Термічна обробка валків відбувалася за режимом, показаним на рисунку 2.

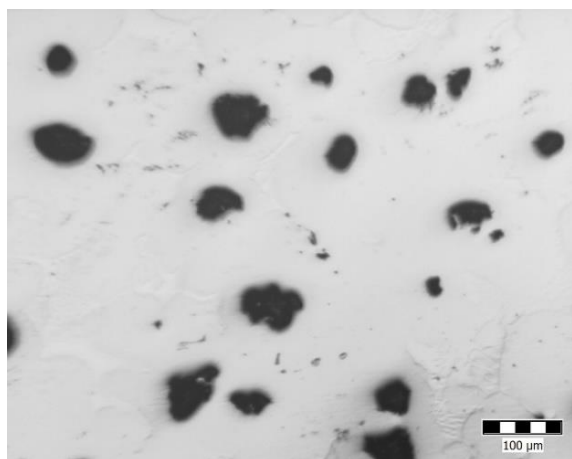
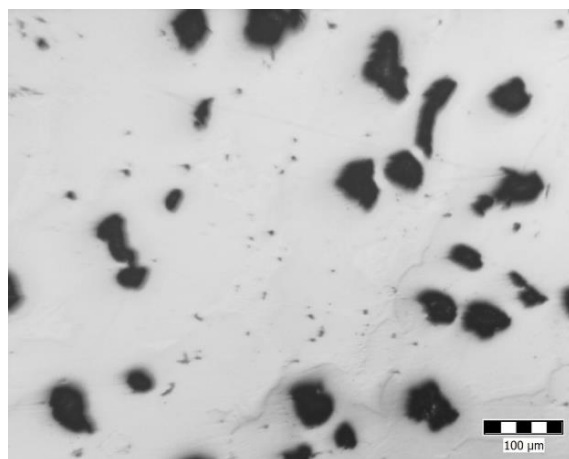
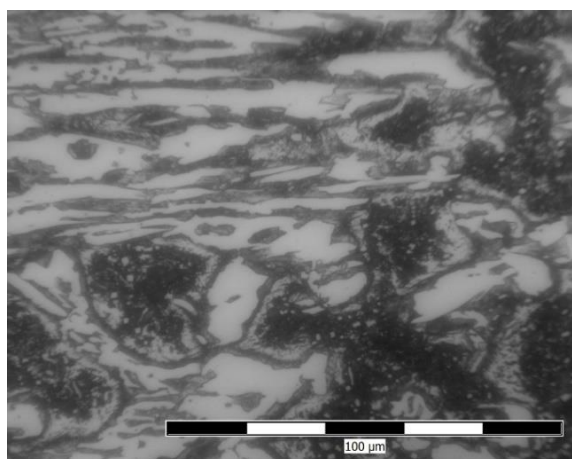
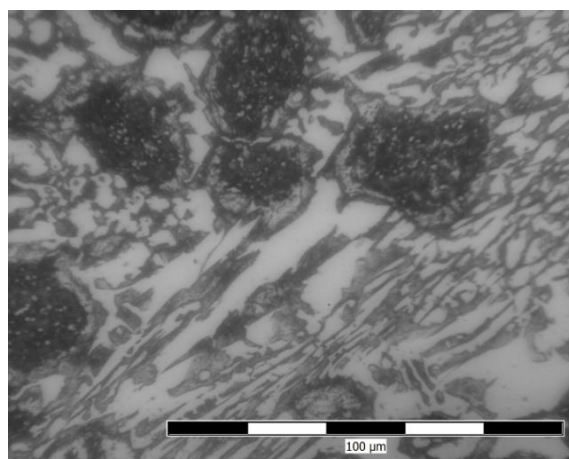
*а**б**в**г*

Рис. 1. Мікроструктура бочок валків виконання ЛПХ17НМдц

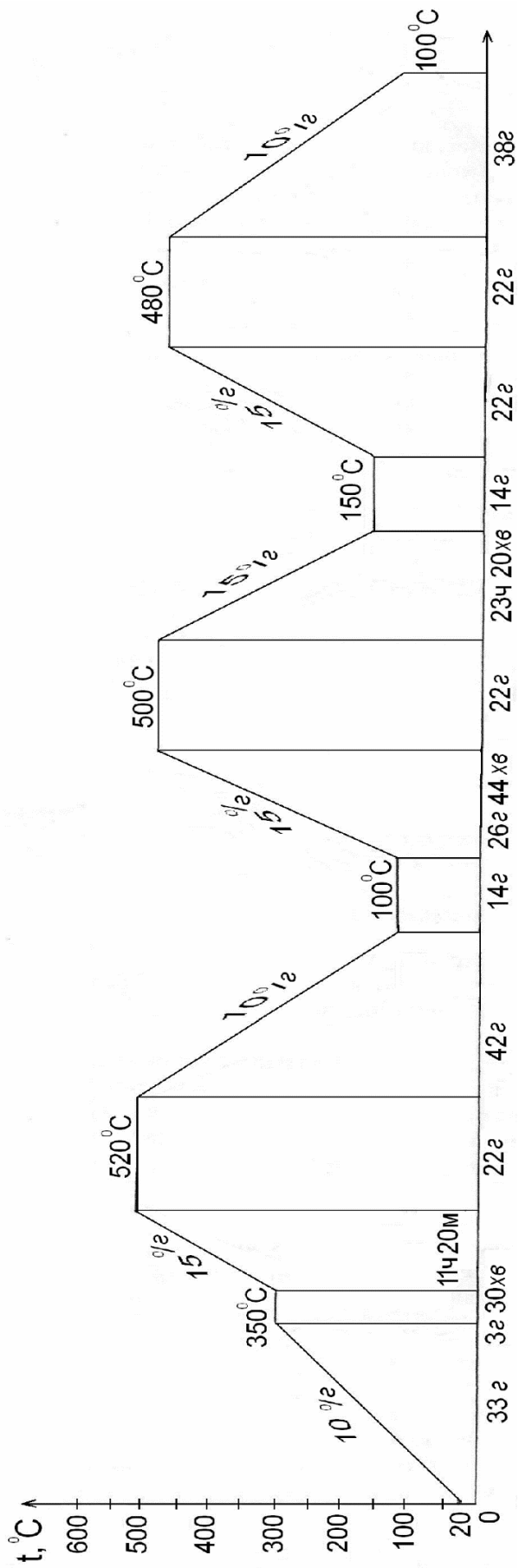


Рис. 2. Режим термічної обробки для зняття остаточних напруг у робочому шарі валків марок ЛПХ17НМДц-63 [13]

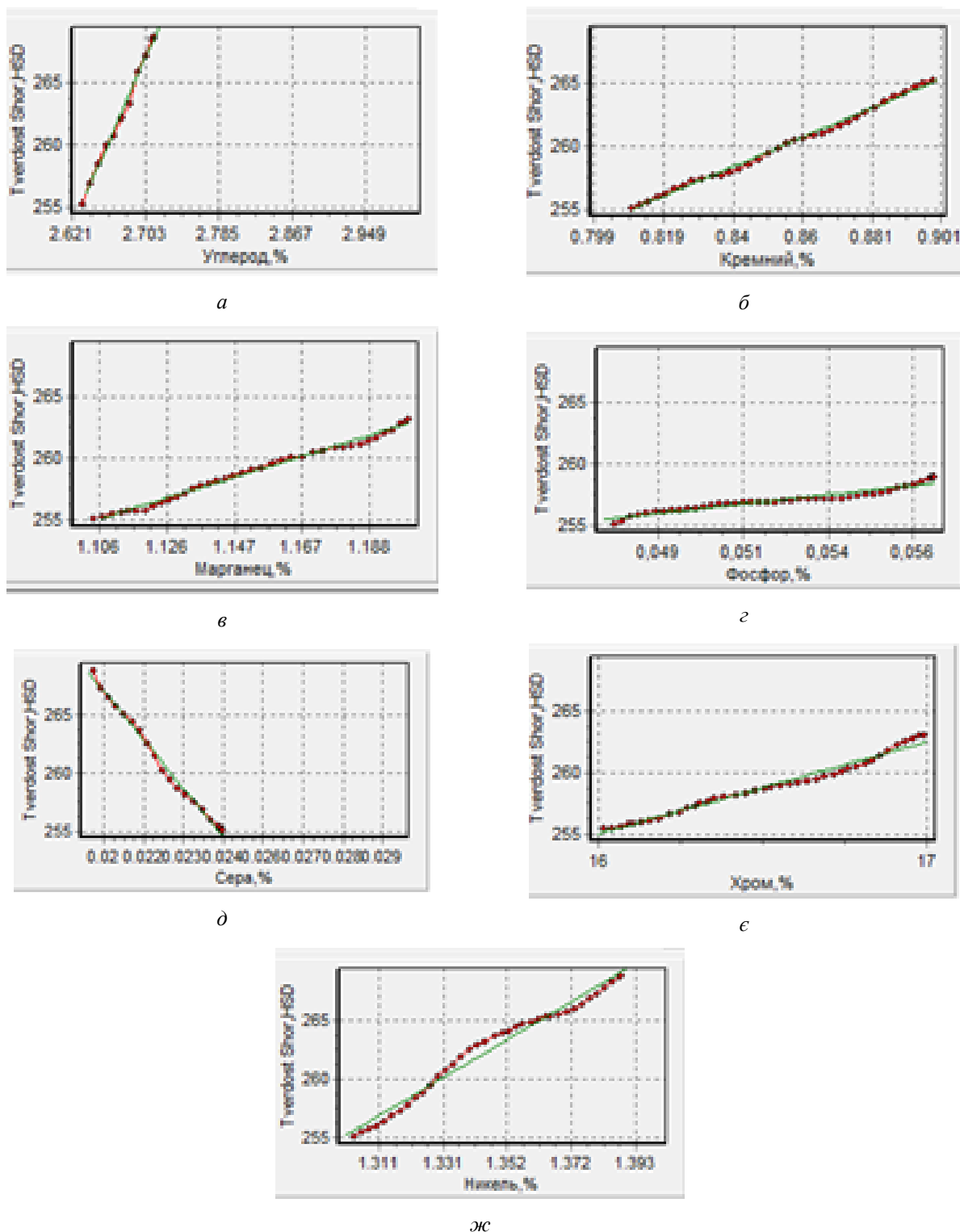


Рис. 3. Залежність твердості валків виконання ЛПХ17НМдц від хімічного складу

У результаті металографічного аналізу (рис. 1, а–г) встановлено, що металічна матриця нижнього тріфу валка до термічної обробки чавуну, мікрولهгованого хромом та нікелем, складається з перліту (81...85 %), цементиту (12...16 %), кулястого графіту (2...3 %). Після термічної обробки

структура низу бочки валка була така: хромисті карбіди + сорбіт відпуску + хустеніт ~ 7 %.

Нижній тріф до термічної обробки мав такі показники твердості залежно від відстані від поверхні бочки: 48 HSD / 5 мм;

49 HSD/25 мм; 48 HSD/50 мм; 47 HSD/75-100 мм; 47 HSD/150 мм; 47 HSD/160 мм.

Після термічної обробки показники твердості нижнього тріффу стали такими: 75 HSD/5-15 мм; 74 HSD/20-35 мм; 73 HSD/75-100 мм; 72 HSD/160 мм.

Результати експерименту. Для обчислень застосовувала програму «Експерт», що розроблена Ю. І. Дубровим, В. М. Волчуком та Ф. В. Криуліним та реалізовану в програмному середовищі Delphi.

Для побудови моделі прогнозу досліднику пропонується визначати такі параметри: назву, мету роботи, задати незалежні (температура повітря, тиск навколишнього середовища), що не впливають на досліджувані параметри. Також дослідник визначає залежні змінні (в даному випадку це може бути хімічний склад, режим термообробки тощо), що впливають на функцію мети. В даному випадку функцією мети виступає твердість валкового чавуну.

Наступний крок досліджень – експертна оцінка. Експертна оцінка ґрунтується на

статистичних та літературних даних. Дослідник будує функцію експертним шляхом. Далі побудована експертним шляхом залежність порівнюється із залежністю, отриманою аналітичним шляхом із використанням програми Excel. Потім вибираються контрольні точки і проводяться експерименти, що мають на меті необхідне коригування значень отриманої експертної моделі на основі експериментальних та статистичних оцінок.

Отриману математичну модель можна коригувати для досягнення необхідної точності, що дозволяє враховувати вирішальний людський фактор у прийнятті остаточного рішення.

Для отримання лінії тренду застосовується програма Excel. У цій програмі отримуються рівняння регресії. В результаті проведеної роботи будуються гістограми впливу параметрів на функцію мети.

На рисунку 3 наведено результати розрахунків впливу елементів хімічного складу досліджуваної марки валків згідно з даними таблиці 1 на показники їх твердості.

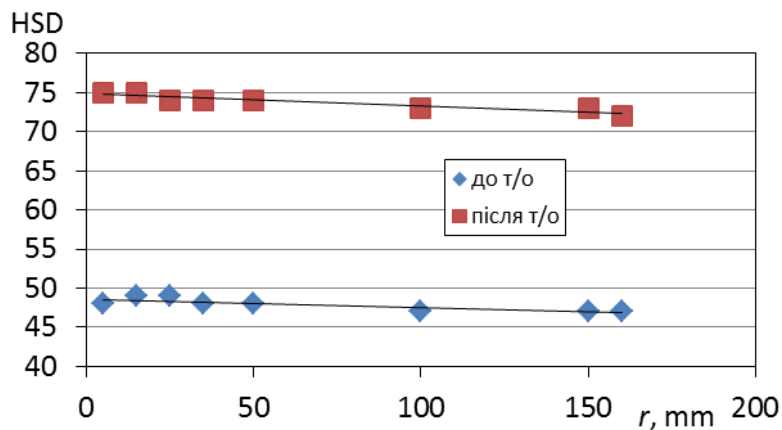


Рис. 4. Зміна твердості HSD бочки валка ЛПХ17НМдц-63 залежно від відстані від поверхні:
1 – до термічної обробки; 2 – після термічної обробки

Збільшення кількості цементиту та, відповідно, зменшення кількості перліту сприяє підвищенню показників твердості завдяки тому, що цементит постає більш твердою фазою порівняно з перлітом. Графіт порівняно зі сталями має низькі механічні показники, тому, чим більше його у структурі, тим більше він послаблює

металеву матрицю, в даному випадку перлітну [1–5].

Застосування термічної обробки дозволило знизити до мінімуму залишкові напруги та підвищити ряд механічних властивостей, зокрема показники твердості валка ЛПХ17Н Мдц-63.

На рисунку 4 показано отримані залежності та наведено математичні моделі,

що описують залежність показників твердості від відстані від поверхні бочки R .

Рівняння регресії (1) та (2), що описують установлені співвідношення на рисунку 4, дозволяють оцінювати з відносною похибкою 5...9% показники твердості бочок валків виконання ЛПХ17НМдц-63 залежно від відстані r від їх поверхні.

До термічної обробки:

$$HSD = -0,0115x + 48,653, R^2 = 0,72. \quad (1)$$

Після термічної обробки:

$$HSD = -0,0158r + 74,817, R^2 = 0,87. \quad (2)$$

Результати досліджень будуть застосовуватися для оперативної оцінки показників твердості бочок на ПАО ДЗПВ.

Висновки. Проведено аналіз впливу термічної обробки на твердість чавунних валків виконання ЛПХ17НМдц. Значення твердості робочої зони валків від 5 до 160 мм після та до термічної обробки змінюється на 2–3 одиниці HSD, що відповідає нормативним вимогам згідно з ТУ У 14-2-1188-97.

Отримано рівняння впливу елементів хімічного складу валків на їх твердість (рис. 3) та встановлено залежність твердості від відстані від поверхні бочки валків, що описується математичними моделями (1) і (2).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Sidashenko A. I., Sokolov R. G. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers. *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43, № 9. Pp. 603–606.
2. Скобло Т. С., Сидашенко А. И., Александрова Н. М., Клочко О. Ю. и др. Производство и применение прокатных валков : справочник. Харьков : ЦД № 1, 2013. 572 с.
3. Скобло Т. С., Воронцов Н. М., Будагьянц Н. А. и др. Прокатные валки из высокоуглеродистых сталей : монография. Москва : Metallurgiya, 1994. 336 с.
4. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin Yev. L. Structure of High-Chromium Cast Iron. *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42, № 3. Pp. 261–268.
5. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin Yev. L. New Approaches in Study of Inhomogeneity of Heterogeneous Structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 2. Pp. 255–280.
6. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin Yev. L., Sidashenko A. I., Avetisyan V. K. Structure formation of high-chromium cast irons in the temperature range of the magnetic transformation of carbide phases. *Pisma o materialakh*. 2020. Vol. 10, № 2. Pp. 129–134.
7. Skoblo T. S., Sidashenko O. I., Saichuk O. V., Klochko O. Yu., Levkin D. A. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron. *Materials Science*. 2020. Vol. 56, № 3. Pp. 347–358.
8. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Romanchenko V. N., Belkin Yev. L. Features of the carbide phase degradation under heating and deformation. *Letters on Materials*. 2021. Vol. 11, № 1. Pp. 22–27.
9. 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.
10. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях. *Доповіди НАН України*. 2014. № 11. С. 77–81. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
11. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 5. С. 12–18. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
12. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 3. С. 21–25. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
13. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с.
14. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Пути прогноза механических свойств прокатных валков. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 1. С. 19–40. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/19-40>
15. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165
16. Большаков Вад. И., Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. Системный анализ технологии производства массивного металлического лиття. *Вісник НАН України*. 2015. № 9. С. 69–73. URL: <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>

17. Волчук В. М., Штанденко М. С. Математична модель прогнозу якості металу. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 2. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290818.31.87>
18. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Прогнозирование и управление качественными характеристиками прокатных валков. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 9. С. 9–14. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/42101>
19. 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>
20. 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 University, Karabuk, Turkey. 2019. Vol. 4. Pp. 415–417. URL: <https://drive.google.com/open?id=1jfWwEhSuRl-3bGev-dG7CzYnmMh7KcVT>
21. Волчук В. Н. Применение вейвлет-анализа для оценки зеренной структуры металлов. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2009. № 4. С. 24–32. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
22. Bausk Yev. A., Volchuk V. M., Uzlov O. V. Remaining Service Life Evaluation of Nuclear Power Plants Construction Steel Elements. *Journal of Physics : Conference Series*. IOP Publishing. 2021. Vol. 1926, № 1. Pp. 012050. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012050>
23. Волчук В. М. Аналіз балової мартенситної структури. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 4. С. 38–44. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241120.38.689>
24. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. К определению класса металла. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 1. С. 26–31. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/24-31/62203>
25. Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий : літерат. письм. твір наук. Характеру. Свідोцтво про реєстрацію автор. права на твір № 53769 ; дата реєстрації автор. права 18.02.2014.
26. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О применении имитационного моделирования в материаловедении. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 4. С. 26–31. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>
27. 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://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
28. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p.
29. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2021. Vol. 1021, № 1. Pp. 012053. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012053/meta>
30. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. *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>
31. Volchuk V., Ivantsov S., Tiutieriev I., Fortyhin A. Search for the Evaluation of “strength – plasticity” Relation in Constructional Steel. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. Pp. 211–216. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.211>
32. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. Pp. 43–52. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.43>
33. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Zotov D. S., Sokoliuk V. I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C–Mn–Al–Ti–N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. 2021. Vol. 2389, № 1. Pp. 080002. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0063496>
34. Vakhrusheva V. S., Volchuk V. M., Hruzyn N. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*. 2021. Vol. 135, № 5. Pp. 57–63. URL: <https://doi.org/10.46813/2021-135-057>
35. Volchuk V. M., Kotov M. A. Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2021. Vol. 1926, № 1. Pp. 012023. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012023>
36. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of structure-properties effect of low carbon steel. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2021. Vol. 1100, № 1. Pp. 012034. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1100/1/012034/meta#references>
37. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества

матеріалів. *Перспективні задачі інженерної науки*. Вип. 2. Под общ. ред. акад. МИА, д. т. н., проф. В. И. Большакова. Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001 С. 203–208.

38. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте. *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества : матер. к 45-му Междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса: АстроПринт, 2006. С. 146–150.

39. Дубров Ю. И., Волчук В. Н., Большаков В. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении. *Моделирование и оптимизация в материаловедении: матер. к 40 междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса : АстроПринт, 2001. С. 25–26.

40. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Определение области компромисса критериев качества чугуновых валков. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 11. С. 4–7.

41. 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 Savvitskiy M. Dnipro : 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>*

REFERENCES

1. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Sidashenko A.I. and Sokolov R.G. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 9, pp. 603–606.

2. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Aleksandrova H.M., Klochko O.Yu. and oth. *Proizvodstvo i primeneniye prokatnykh valkov : spravochnik* [Production and use of rolling rolls : dictionary]. Kharkiv : CD no. 1, 2013, 572 p. (in Russian).

3. Skoblo T.S., Vorontsov N.M., Budagyants N.A. and oth. *Prokatnyye valki iz vysokouglerodistykh staley* [Rolling rolls made of high-carbon steels]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1994, 336 p. (in Russian).

4. Skoblo T.S., Klochko O.Yu. and Belkin Yev.L. Structure of high-chromium cast iron. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 3, pp. 261–268.

5. Skoblo T.S., Klochko O.Yu. and Belkin Yev.L. New Approaches in Study of Inhomogeneity of Heterogeneous Structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018, vol. 40, no. 2, pp. 255–280.

6. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin Yev.L., Sidashenko A.I. and Avetisyan V.K. Structure formation of high-chromium cast irons in the temperature range of the magnetic transformation of carbide phases. *Pisma o materialakh*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 129–134.

7. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Saichuk O.V., Klochko O.Yu. and Levkin D.A. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron. *Materials Science*. 2020, vol. 56, no. 3, pp. 347–358.

8. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Romanchenko V.N. and Belkin Yev.L. Features of the carbide phase degradation under heating and deformation *Letters on Materials*. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 22–27.

9. Bol'shakov 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]. *Metalloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).

10. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovani 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. 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).

12. 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).

13. 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).

14. 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]. *Metalloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 1, pp. 19–40. (in Russian).

15. 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.

16. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva masynnoho 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).
17. 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).
18. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Prognozirovaniye i upravleniye kachestvennyimi 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).
19. 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]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
20. 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.
21. Volchuk V.N. *Primeneniye veyvlet-analiza dlya otsenki zerennoy struktury metallov* [The use of wavelet analysis to assess the grain structure of metals]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2009, no. 4, pp. 24–32. (in Russian).
22. Bausk Yev.A., Volchuk V.M. and Uzlov O.V. Remaining Service Life Evaluation of Nuclear Power Plants Construction Steel Elements. *Journal of Physics : Conference Series*. IOP Publishing. 2021, vol. 1926, no. 1, pp. 012050.
23. Volchuk V.M. *Analiz balovoyi martensytnoyi struktury* [Analysis of the martensitic structure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2020, no. 4, pp. 38–44. (in Ukrainian).
24. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu klassa metalla* [To the definition of a class of metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 1, pp. 26–31. (in Russian).
25. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Sposob opredeleniya oblasti kompromissa kriteriev kachestva mnogokriterial'nykh tekhnologiy : svidotstvo pro reiestratsiyu avtorskogo prava na tvir* [The method for determining the area of compromise quality criteria of multi-criteria technologies : certificate of registration a copyright for an invention in Ukraine]. No. 53769, 18.02.2014.
26. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii imitatsionnogo modelirovaniya v materialovedenii* [The application simulated modelling in materials science]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 4, pp. 26–31. (in Russian).
27. 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.
28. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
29. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V. and Ivantsov S.V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2021, vol. 1021, no. 1, pp. 012053.
30. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka 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.
31. Volchuk V., Ivantsov S., Tiutieriev I. and Fortyhin A. Search for the Evaluation of “strength – plasticity” Relation in Constructional Steel. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 864, pp. 211–216.
32. Kroviakov S., Volchuk V. and Zavoloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 864, pp. 43–52.
33. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Zotov D.S. and Sokoliuk V.I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C–Mn–Al–Ti–N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2021, vol. 2389, no. 1, pp. 080002.
34. Vakhrusheva V.S., Volchuk V.M., Hruzin N.V. and Tiutieriev I.A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021, vol. 135, no. 5, pp. 57–63.
35. Volchuk V.M. and Kotov M.A. Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2021, vol. 1926, no. 1, pp. 012023.
36. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Ivantsov S.V. and Tiutieriev I.A. Fractal model of structure-properties effect of low carbon steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2021, vol. 1100, no. 1, pp. 012034.

37. Bol'shakov 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]. Part 2, Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, pp. 203–208. (in Russian).
38. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Dubrov Yu.I. and Deyneko L.N. *Formirovanie modeli prognoza kachestva materiala, osnovannoy 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. Fam. on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa : AstroPrint, 2006, pp. 146–150. (in Russian).
39. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov 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]. *Modelirovaniye i optimizatsiya v materialovedenii : mater. k 40-mu mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : proc. to 40th Int. Fam. on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa : AstroPrint, 2001, pp. 25–26. (in Russian).
40. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Opredeleniye oblasti kompromissa kriteriyev kachestva chugunnykh valkov* [Scoping compromise quality criteria of cast iron rolls]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 11, pp. 4–7. (in Russian).
41. 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 : Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, pp. 48–53.

Надійшла до редакції: 01.12.2021.