

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.281221.53.824

## ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛУ НЕРУЙНІВНИМ СПОСОБОМ

КУРАЖЕНКО А. В.<sup>1</sup>, *магістр*,ТЮТЕРЄВ І. А.<sup>2\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,ЧАЙКОВСЬКА Г. О.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*<sup>1</sup> 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: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com)<sup>2\*</sup> 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: [lab120@mail.pgasa.dp.ua](mailto:lab120@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-1224-3355<sup>3</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: [chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua](mailto:chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-6707-0159

**Анотація.** *Вступ.* Для оцінювання якості металу неруйнівними способами застосовують різні підходи. До них можна віднести ультразвукову діагностику, рентгенівські методи, оптичну та електронну мікроскопію та математичні методи прогнозу. Останні відрізняються можливістю поліпшувати отримані моделі шляхом коригування аргументів (в даному випадку досліджуваних параметрів технології). Особливо гостро ця проблема постає під час оцінювання критеріїв якості масивних металевих відливок, до яких належать чавунні прокатні валки. **Матеріали та методика.** Як матеріал для дослідження обрано сортопрокатний валковий чавун виконання СПХН на предмет вивчення впливу його хімічного складу на механічні властивості (твердість НВ; межа міцності на розтяг –  $\sigma_B$ ; межа міцності на згин –  $\sigma_{згин}$ ). Структура робочого шару бочок валкового чавуну (до 50 мм від поверхні) складалася з перлітної матриці (70...85 %), цементиту ледебуритної евтектики (13...28 %) і графіту з пластинчастою формою (до 2,5 %). **Результати експерименту.** З використанням матриці планування експериментів отримано математичні моделі прогнозу обраних критеріїв якості валкового чавуну залежно від впливу на них елементів хімічного складу. З метою підвищення результатів прогнозу механічних властивостей застосовували симбіоз експертних та експериментальних оцінок. Застосування такого підходу надало можливість зменшити витрати на проведення механічних іспитів, що актуально для розглянутої періодичної технології. Значення рядків матриці планування, де не вистачало експериментальних оцінок показників механічних властивостей, замінювалися на експертні оцінки. В рядках матриці 6 та 13–16 наведено експертні оцінки. Коефіцієнти парної кореляції отриманих рівнянь регресії змінюються в діапазоні 0,71...0,83, що дозволяє їх використовувати з практичною метою для прогнозу та коригування механічних характеристик у процесі виготовлення чавунних сортопрокатних валків. **Висновки.** Досліджено вплив елементів хімічного складу (вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору, сірки, хрому та нікелю) валкового чавуну виконання СПХН на його механічні властивості:  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$  та НВ. Отримані рівняння оцінки механічних властивостей рекомендовано застосовувати на підприємстві ДЗПВ м. Дніпро для їх оперативного прогнозу.

**Ключові слова:** *хімічний склад; структура; механічні властивості; рівняння прогнозу*

EVALUATION OF MATERIAL QUALITY  
BY NON-DESTRUCTIVE METHODKURAZHENKO A.V.<sup>1</sup>, *Master of Engineering*,TIUTIERIEV I.A.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,CHAIKOVSKA H.O.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*<sup>1</sup> 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: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com)<sup>2\*</sup> 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: [lab120@mail.pgasa.dp.ua](mailto:lab120@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-1224-3355<sup>3</sup> Department of Material Science and Treatment of Materials, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (0562) 46-93-72, e-mail: [chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua](mailto:chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-6707-0159

**Abstract. Introduction.** Different approaches are used to assess the quality of metal by non-destructive methods. These include ultrasound, X-ray, optical and electron microscopy, and mathematical prediction. The latter differ in the ability to improve the obtained models by adjusting the arguments (in this case, the studied parameters of technology). This problem is especially acute when assessing the quality criteria for solid metal castings, which include cast iron rolls. **Materials and methods.** As a material for the study, high-grade rolled cast iron of СІХН was selected to study the effect of its chemical composition on mechanical properties (HB hardness; tensile strength  $\sigma_B$ ; flexural strength  $\sigma_{згин}$ ). The structure of the working layer of cast iron barrels (up to 50 mm from the surface) consisted of a pearlite matrix (70... 85 %), ledeburite eutectic cementite (13... 28 %) and plate-shaped graphite (up to 2,5 %). **The results of the experiment.** Using the matrix of experimental planning, mathematical models of forecasting the selected quality criteria of cast iron depending on the influence of elements of chemical composition on them are obtained. In order to increase the results of the forecast of mechanical properties, a symbiosis of expert and experimental evaluations was used in the work. The application of this approach has made it possible to reduce the cost of conducting mechanical examinations, which is relevant for the considered periodic technology. The values of the rows of the planning matrix, where there were not enough experimental estimates of mechanical properties, were replaced by expert estimates. Rows 6 and 13–16 of the matrix provide expert assessments. The pairwise correlation coefficients of the obtained regression equations vary in the range of 0,71...0,83, which allows them to be used for practical purposes to predict and adjust the mechanical characteristics in the process of manufacturing cast iron rolls. **Conclusions.** The influence of elements of chemical composition (carbon, silicon, manganese, phosphorus, sulfur, chromium and nickel) of rolled cast iron of SPHN performance on its mechanical properties:  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$  and HB is investigated. It is recommended to apply the obtained equations of estimation of mechanical properties at the enterprise ДЗПВ of Dnipro for their operative forecast.

**Keywords:** chemical composition; structure; mechanical properties; forecast equations

**Вступ.** У процесі виготовлення масивних металевих виробів багато факторів впливають на їх кінцеві службові характеристики, до яких можна віднести механічні властивості [1–4]. До масивних металевих виробів можна додати і чавунні валки, від якості яких багато в чому залежить якість готової металопродукції. Один з основних параметрів технології, що суттєво впливають на критерії якості валків, – це їх хімічний склад. Однак багатофункціональність та періодичність технології їх виробництва значною мірою впливають на їх якість [5–8] завдяки можливій зміні технологічних характеристик [9; 10].

Застосування неруйнівних методів контролю якості чавунних валків, до яких належать математичні методи [11–15], дозволяє з мінімальними витратами прогнозувати їх необхідні службові характеристики. До математичних методів оцінювання властивостей матеріалів можна віднести і фрактальні методи, що базуються на застосуванні дробових оцінок розмірності досліджуваних об'єктів [16–25]. Фрактальна розмірність дозволяє більш точно ідентифікувати геометрично складні елементи структури матеріалів на мікроскопічному рівні, що вигідно відрізняє

її від традиційних геометричних характеристик (довжина, площа, об'єм).

Широко розповсюджені підходи, де застосовуються експертні дані [26; 27], методики аналізу робочих областей критеріїв якості матеріалів [28; 29]. Для ідентифікації періодичних технологій застосовують матриці планування [30–33].

У наведеному дослідженні застосовується методика планування експериментів для прогнозу механічних характеристик валкового чавуну з одночасним поєднанням експериментальних та експертних даних.

**Матеріали та методика.** Чавунні сортопрокатні (С) валки експлуатуються в обтискних та чорнових клітках, клітках різносортних трубопрокатних станів. Їх технологічний стан позначається на службових характеристиках металу.

Таблиця 1

Хімічний склад валкового чавуну в (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
2,50...3,60	0,70...1,80	0,38...0,80	0,20...0,40	0,06...0,16	0,50...1,00	0,40...1,50

Хімічний склад чавунних валків виконання СПХН наведено в таблиці 1. Розглядався валковий чавун зі сколів бочок,

що не піддавалися термічній обробці (відпалу).

Механічні властивості валкового чавуну (твердість – НВ; межа міцності на розтяг –  $\sigma_B$ ; межа міцності на згин –  $\sigma_{згин}$ ) визначалися за допомогою традиційних методів випробувань.

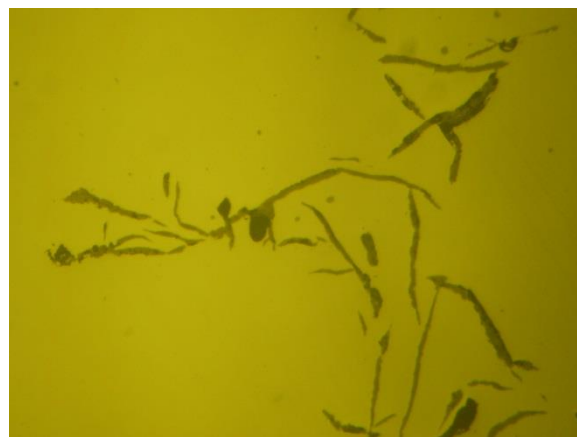
Металографічні дослідження проводилися за збільшення мікроскопу Neophot  $\times 200$  (рис. 1). Зразки шліфувались, полірувались та проходили травлення в 4 % розчині азотної кислоти в етиловому спирті.

Для оцифрування фотознімків мікроструктури чавуну застосовували фотоапарат марки “Olympus C-50”. Знімки структури переводили в 256-колірний формат із відтінками сірого кольору.

Структура робочого шару валкового чавуну (до 50 мм від поверхні) складалася з перлітної матриці (70...85 %), карбідів у вигляді цементиту ледебуритної евтектики (13...28 %) та включень пластинчастого графіту (до 2,5 %).



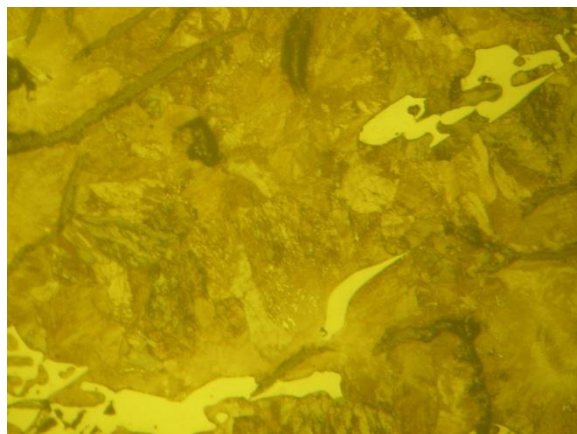
а



б



в



г

Рис. 1. Мікроструктура чавуну до травлення (а, б) та після травлення (в, г)

Для досліджень обирали експериментальні дані за хімічним складом та механічними властивостями сортопрокатних валків виконання СПХН виробництва Дніпровського заводу прокатних валків м. Дніпро.

**Результати експерименту.** В роботі реалізовано матрицю планування на 16 рядків (табл. 2). Її реалізація зумовлена багатокритеріальністю технології виробництва чавунних валків, де сам процес виробництва від відливки чавуну у форми до їх охолодження може тривати 2–4 доби. Тому

для ідентифікації такої складної періодичної технології застосовувався математичний апарат.

Застосовували симбіоз експертних та експериментальних оцінок механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків виконання СПХН підприємства ДЗПМ м. Дніпро. Такий підхід дозволив мінімізувати витрати на проведення натурних (механічних) іспитів. Ті рядки матриці планування експериментів, де були відсутні значення показників механічних властивостей чавуну, замінювали на експертні оцінки (рядки 6 та рядки 13–16).

У стовпцях 9, 11 та 13 матриці планування наведено експериментальні значення механічних властивостей  $Y_{1\text{екс}}$ ,  $Y_{2\text{екс}}$ ,  $Y_{3\text{екс}}$ , крім вищезгаданих показників рядків 6, 13–16, в яких містяться експертні оцінки прогнозу.

Значення механічних властивостей  $Y_{1\text{роз}}$ ,  $Y_{2\text{роз}}$ ,  $Y_{3\text{роз}}$  отримані аналітично за

допомогою побудованих на наступному кроці досліджень математичних моделей їх прогнозу.

У таблиці 2 матриці планування наведено такі скорочення:

- ЗР – загальний (середній) рівень аргументів функції мети  $X_1...X_7$ ;
- НР – нижні (мінімальні) показники  $X_1...X_7$ ;
- ВР – верхні (максимальні) показники  $X_1...X_7$ ;
- ІВ – інтервал варіювання, тобто відхилення значень  $X_1...X_7$  від їх середнього значення.

Аргументами  $X_1...X_7$  у матриці планування виступали такі показники хімічного складу валків: вуглець, кремній, марганець, фосфор, сірка, хром та нікель відповідно.

Таблиця 2

Матриця планування експерименту

ЗР	3,05	1,25	0,62	0,30	0,11	0,75	0,95	Механічні властивості						
ІВ	0,55	0,55	0,24	0,10	0,05	0,25	0,55							
НР	2,50	0,70	0,38	0,20	0,06	0,50	0,40							
ВР	3,60	1,80	0,80	0,40	0,16	1,00	1,50							
Позначення	С	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Твердість		$\sigma_B$		$\sigma_{згин}$		
Розмірність	%	%	%	%	%	%	%	НВ		МПа		МПа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Код	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	$Y_{1\text{екс}}$	$Y_{1\text{роз}}$	$Y_{2\text{екс}}$	$Y_{2\text{роз}}$	$Y_{3\text{екс}}$	$Y_{3\text{роз}}$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	230	235	390	379	690	682
2	+	+	+	+	-	+	+	+	250	238	425	418	750	738
3	+	+	+	-	+	+	-	-	250	252	435	455	765	789
4	+	+	+	-	-	+	-	-	250	256	495	493	850	845
5	+	+	-	+	+	-	+	-	245	240	490	535	845	894
6	+	+	-	+	-	-	+	-	230	243	600	573	980	950
7	+	+	-	-	+	-	-	+	252	245	540	509	900	858
8	+	+	-	-	-	-	-	+	249	249	535	548	890	913
9	+	-	+	+	+	-	-	+	251	264	545	525	850	837
10	+	-	+	+	-	-	-	+	273	268	525	563	860	893
11	+	-	+	-	+	-	+	-	271	265	530	532	890	882
12	+	-	+	-	-	-	+	-	270	269	590	570	950	938
13	+	-	-	+	+	+	-	-	264	263	600	582	975	943
14	+	-	-	+	-	+	-	-	272	266	620	620	985	998
15	+	-	-	-	+	+	+	+	251	252	475	488	815	844
16	+	-	-	-	-	-	+	+	248	255	520	526	910	900

$$Y_{1\text{роз}} = 329,527 \cdot X_0 - 16,364 \cdot X_1 + 3,864 \cdot X_2 - 7,738 \cdot X_3 - 17,500 \cdot X_4 - 32,500 \cdot X_5 - 6,500 \cdot X_6 - 5,455 \cdot X_7$$

$$R^2 = 0,71 \quad (1)$$

$$Y_{2_{роз}} = 948,075 \cdot X_0 - 56,250 \cdot X_1 - 50,568 \cdot X_2 + 22,321 \cdot X_3 - 190,625 \cdot X_4 - 493,750 \cdot X_5 - 68,750 \cdot X_6 - 46,023 \cdot X_7 \quad R^2 = 0,79 \quad (2)$$

$$Y_{3_{роз}} = 1\,419,640 \cdot X_0 - 64,205 \cdot X_1 - 78,977 \cdot X_2 - 10,417 \cdot X_3 - 278,125 \cdot X_4 - 531,250 \cdot X_5 - 61,250 \cdot X_6 - 65,341 \cdot X_7 \quad R^2 = 0,83 \quad (3)$$

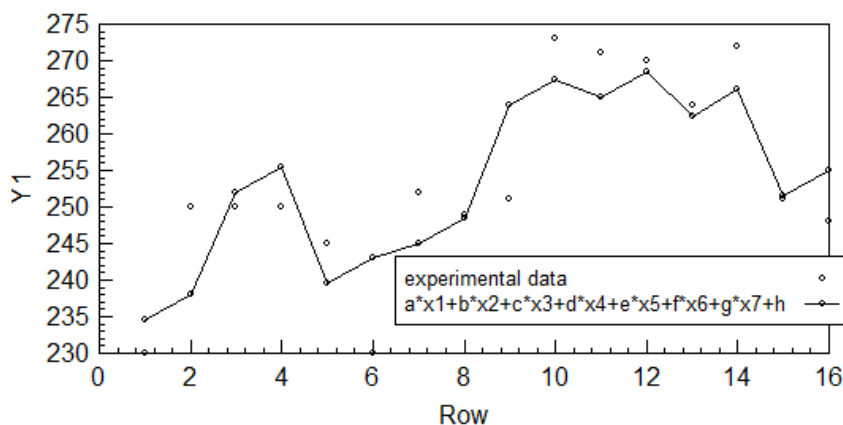
У результаті аналізу матриці планування експериментів отримано рівняння регресії (1–3), що дозволяють оцінювати механічні властивості валкового чавуну виконання СПХН на основі аналізу комплексного впливу на них елементів хімічного складу.

Отримані коефіцієнти кореляції  $R^2$  моделей (1–3) дають змогу прогнозувати та коригувати із задовільною точністю досліджувані механічні властивості валків у процесі їх виготовлення на підприємстві ДЗПВ (м. Дніпро). Для більш точних оцінок прогнозу механічних властивостей валкового чавуну виконання СПХН необхідно враховувати вплив інших характеристик, наприклад, кількісний склад елементів їх структури, інших технологічних параметрів.

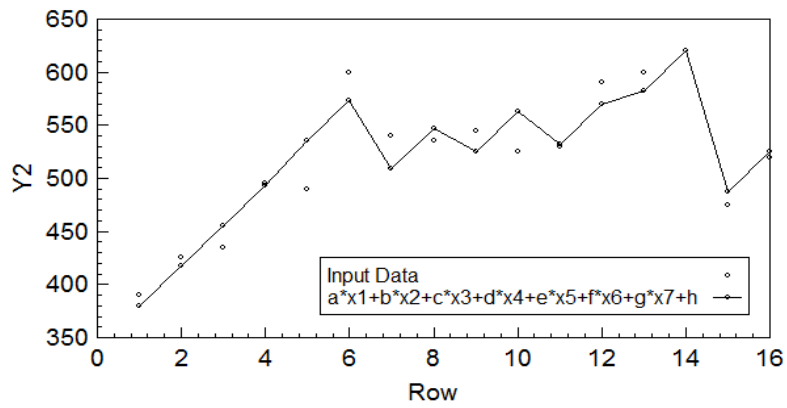
Виконано порівняльну характеристику експериментальних значень механічних властивостей прокатних валків виконання СПХН та значень цих властивостей, обчислених за допомогою отриманих моделей прогнозу (1–3) (рис. 2). У цій статті

не наводиться детальний аналіз впливу кожного елемента хімічного складу на механічні властивості чавуну, оскільки, як уже раніше зазначалося, цьому питанню присвячено багато прикладних робіт (див., наприклад, [1–4] та ін.).

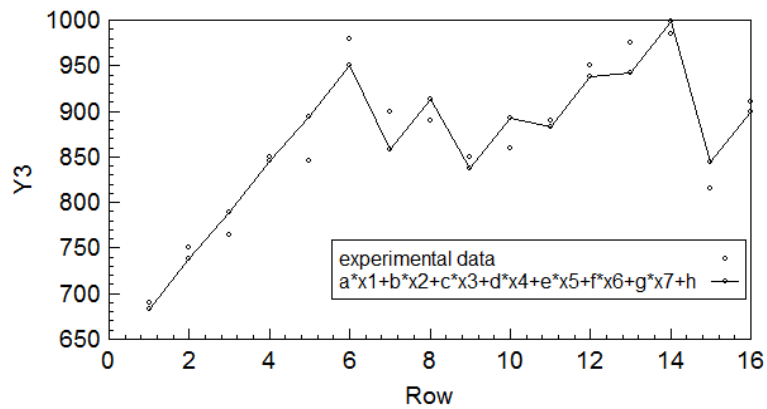
Найкращий збіг експериментальних та розрахункових значень твердості (1) спостерігається для першого, третього, шостого, восьмого, дванадцятого, тринадцятого та п'ятнадцятого рядків (Row) (рис. 2, а) із даних матриці експериментів. Для межі міцності на розтяг найкраща збіжність результатів спостерігається для значень першого, четвертого, з восьмого по дванадцятий та п'ятнадцятого рядків матриці планування (рис. 2, б). Для межі міцності на згин найкраща збіжність результатів оцінювання механічних властивостей спостерігається для значень першого, четвертого та з восьмого по чотирнадцятий рядков матриці планування проведених експериментів (рис. 2, в).



a

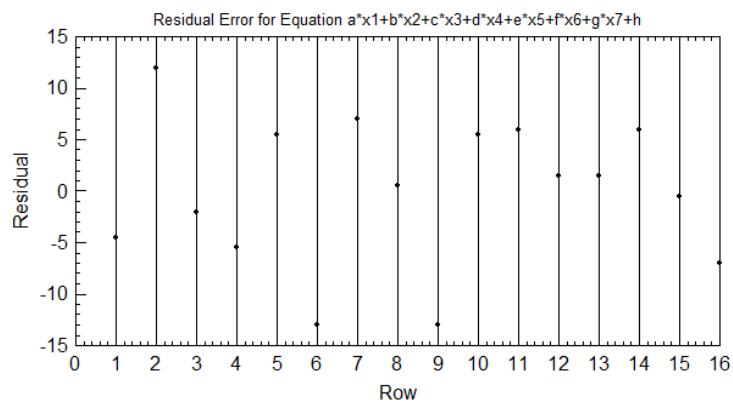


б



в

Рис. 2. Порівняльна характеристика результатів експерименту та обчислених за допомогою моделей (1–3)



а

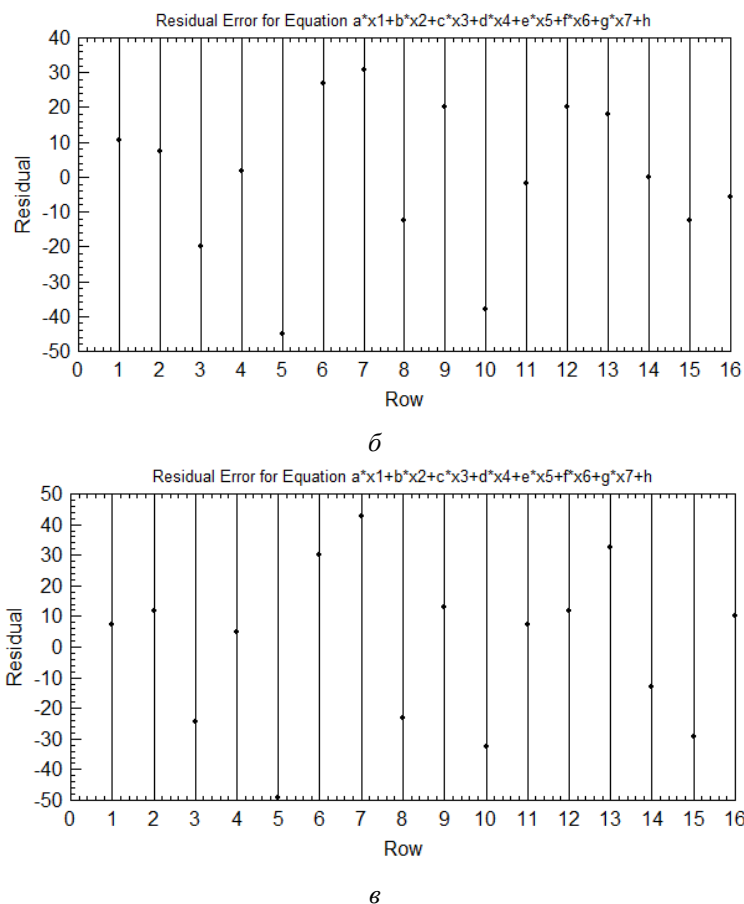


Рис. 3. Абсолютні похибки експерименту прогнозу механічних властивостей чавуну

Результати розбіжності експериментальних значень механічних властивостей та результатів їх прогнозу наведено на рисунку 3.

Найбільша розбіжність показників твердості спостерігається для шостого рядка матриці і становить 13 НВ, а найменше – для восьмого та п'ятнадцятого рядків – становить лише 0,5 НВ. Максимальна розбіжність значень межі міцності на розтяг 38 МПа визначена для десятого рядка матриці, найменша – 0 МПа для чотирнадцятого рядка. Найбільше значення абсолютної похибки для показників міцності на згин зафіксоване для п'ятого рядка матриці і становить 49 МПа, а найменша похибка 5 МПа – для четвертого.

Отримані рівняння (1–3) відображають комплексний вплив елементів хімічного складу на механічні властивості у

встановлених межах експерименту. Залежно від зміни вмісту елементів хімічного складу чавуну механічні властивості будуть змінюватися в більш широкому інтервалі у зв'язку з багатопараметричністю технології його виготовлення [34–36].

**Висновки.** Отримано базу знань у вигляді рівнянь регресії, що дозволяє проводити експертне оцінювання впливу елементів хімічного складу валкового чавуну виконання СПХН на його механічні властивості (НВ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ ). Визначені коефіцієнти кореляції рівнянь змінюються в діапазоні 0,71...0,83, що дозволяє їх використовувати із практичною метою для прогнозу та коригування механічних характеристик у процесі виготовлення чавунних сортопрокатних валків.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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

2. Кривошеев А. Е. Литые валки : монография. Москва : Металлургиздат, 1957. 360 с.
3. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2013. № 4. С. 5–11.
4. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях. *Доповіді НАН України*. 2014. № 11. С. 77–81. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
5. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ. 2014. № 5. С. 12–18. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
6. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 3. С. 21–25. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
7. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с.
8. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Пути прогноза механических свойств прокатных валков. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 1. С. 19–40. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/19-40>
9. 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
10. 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>
11. 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>
12. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
13. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СПХН-43 та СІПХНФ-47. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.22.597>
14. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium, April 4-6, 2019, Karabuk University, Karabuk, Turkey. 2019. Vol. 4. Pp. 415–417. URL: <https://drive.google.com/open?id=1jfWwEhSuRl-3bGev-dG7CzYnmMh7KcVT>
15. Волчук В. Н. Применение вейвлет-анализа для оценки зеренной структуры металлов. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2009. № 4. С. 24–32. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
16. 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>
17. Kroviakov S., Volchuk V., Zavaloka 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>
18. 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>
19. Kroviakov S., Volchuk V., Zavaloka 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>
20. 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>
21. Vakhruшева 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>
22. 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>



23. 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>
24. 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>
25. 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>
26. 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 материалов. *Перспективные задачи инженерной науки*. Вып. 2. Под общ. ред. акад. МИА, д. т. н., проф. В. И. Большакова. Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001. С. 203–208.
27. 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.
28. 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.
29. 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>
30. 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-му междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса : АстроПринт, 2001. С. 25–26.
31. Kroviakov S., Zvoloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019. Vol. 10, № 19. Pp. 81–86. URL: <https://doi.org/10.13167/2019.19.8>
32. Lyashenko T., Voznesensky V., Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. *International symposium on brittle matrix composites*. 2000. Pp. 210–219. URL: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=1141801>
33. Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Fractal approach in assessing the quality of steel 20. *Innovative Lifecycle Technologies of Housing, Industrial and Transportation Objects : collective monograph, under the general editorship Savytskyi M. Dnipro : 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>
34. 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>
35. 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>
36. Волчук В., Токосов С. Спосіб прогнозу механічних властивостей чавунних валків. *ScienceRise*. 2018. Т. 11. С. 57–61. URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.150342>

## REFERENCES

1. 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).
2. Krivocheev A.Yev. Cast rolls. Moscow : Metallurgy Publ., 1957, 360 p. (in Russian).
3. 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]. *Metалознавство та термічна обробка металів* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
4. 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).
5. 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 Prydniprovs'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).

6. 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).

7. 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).

8. 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).

9. 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.

10. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnystva masynnoho metalevoho 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).

11. 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.

12. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. Fractals and properties of materials. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.

13. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkov 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)

14. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium, April 4-6, 2019, Karabuk University, Karabuk, Turkey, 2019, vol. 4, pp. 415–417.

15. Volchuk V.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).

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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).

25. 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.

26. 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]. *Perspektivnyye zadachi inzhenernoy nauki* [Perspective Tasks of Engineering Science]. Part 2, Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, pp. 203–208. (in Russian).

27. 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]. *Komp'yuternoye materialovedeniye i obespecheniye kachestva : mater. k 45-mu Mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : Proc. of 45th Int. Fam. on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa : AstroPrint, 2001, pp. 146–150. (in Russian).
28. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Opredeleyeniye oblasti kompromissa kriteriyev kachestva chugunnykh valkov* [Scoping compromise quality criteria of cast iron rolls]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 11, pp. 4–7. (in Russian).
29. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu klassa metalla* [To the definition of a class of metal]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 1, pp. 26–31. (in Russian).
30. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovaniy 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).
31. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019, vol. 10, no. 19, pp. 81–86.
32. Lyashenko T., Voznesensky V. and Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. *International symposium on brittle matrix composites*. 2000, pp. 210–219.
33. Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. *Fractal approach in assessing the quality of steel 20*. *Innovative Lifecycle Technologies of Housing, Industrial and Transportation Objects : collective monograph, under the general editorship Savytskyi M. Dnipro : SHEE "Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture"; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava*, 2018, pp. 48–53.
34. Volchuk V.M. and Shtandenko M.S. *Matematychna model prohnozu yakosti metalu* [Mathematical model of the metal quality forecast]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 2, pp. 31–35. (in Ukrainian).
35. 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 Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 9, pp. 9–14. (in Russian).
36. Volchuk V. and Tokosov S. *Sposib prohnozu mekhanichnykh vlastyvostey chavunnykh valkov* [Method of forecasting mechanical properties of cast-iron rolls]. *ScienceRise*. 2018, vol. 11, pp. 57–61. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.11.2021.