

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.230321.30.732

**ПРОГНОЗ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБІВ ІЗ МЕТАЛУ**

ІВАНЦОВ С. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 ТЮТЕРЄВ І. А.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 СЛУПСЬКА Ю. С.<sup>3</sup>, аспір.,  
 СІНЧУК Р. Р.<sup>4</sup>, магістр

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua](mailto:serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, 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, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: [slupska.yuliia@pgasa.dp.ua](mailto:slupska.yuliia@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-7983-1602

<sup>4</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com)

**Анотація. Постановка проблеми.** Механічні властивості металу залежать, у першу чергу, від його хімічного складу та структури. Структура матеріалів із металу формується за впливу різних температурних режимів виготовлення та охолодження. Моделі прогнозу механічних характеристик сталей та чавунів базуються на впливі хімічного складу та структури. Розглянуто підхід, що дозволяє оцінювати механічні властивості сортопрокатних (С) чавунних валків із перлітною (П) матрицею залежно від комплексного впливу елементів їх хімічного складу. **Матеріали та методика.** Досліджувалась робоча зона зразків із валкового чавуну марки СПХН від поверхні до 50 мм, легованого хромом (Х) і нікелем (Н). Вміст карбідів змінювався від 10 до 15 %; а пластинчастого графіту не перевищував 2 %. **Результати експерименту.** Для моделювання механічних характеристик чавунних валків застосовано методику планування експериментів. Вибір методики зумовлений багатопараметричністю технології виробництва масивного металевого лиття. Застосування цієї методики дозволило отримати моделі прогнозу механічних характеристик валкового чавуну СПХН залежно від впливу елементів хімічного складу валків (С, Si, Mn, P, S, Cr, Ni). Похибка у прогнозі межі міцності на розтяг  $\sigma_B$ , межі міцності на згин  $\sigma_{згин}$  та твердості за методикою Шора HSD не перевищувала 5,89 %. Під час перевірки моделей на збіжність результатів за критерієм Фішера при критичному значенні  $F_{крит} = 2,400$  для  $\sigma_B$  цей коефіцієнт становив 1,249; для  $\sigma_{згин}$  – 1,289 і для HSD – 1,012. Для аналізу впливу вуглецю на механічні характеристики побудовано двовимірні графіки залежності. **Висновки.** В межах робочих значень параметрів хімічного складу чавунних сортопрокатних валків СПХН-45 згідно з існуючими нормативними документами проведено прогноз їх механічних характеристик у дозволених межах похибки експериментальних даних. Результати роботи дозволяють за отриманими математичними моделями в процесі виробництва валків марки СПХН оперативно встановлювати їх хімічний склад у межах штатної технології згідно з вимогами замовника на дані механічні характеристики. Крім того, за отриманими моделями можна прогнозувати ці характеристики виготовлених валків із мінімальними матеріальними та часовими витратами.

**Ключові слова:** сортопрокатні валки; елементи хімічного складу; механічні характеристики; багатопараметрична технологія

**FORECAST OF MECHANICAL PROPERTIES OF METAL PRODUCTS**

IVANTSOV S.V.<sup>1\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
 TIUTIERIEV I.A.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
 SLUPSKA Yu.S.<sup>3</sup>, Postgrad. Student,  
 SINCHUK R.R.<sup>4</sup>, Master of Engineering

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua](mailto:serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

<sup>2</sup> Department of Materials Science, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, 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., 49600, Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 46-93-72, e-mail: [slupska.yuliia@pgasa.dp.ua](mailto:slupska.yuliia@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-7983-1602

<sup>4</sup> Department of Materials Science, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com)

**Abstract. Introduction.** The mechanical properties of the metal depend primarily on their chemical composition and structure. The structure of metal materials is formed under the influence of different temperature modes of manufacture and cooling. Models for predicting the mechanical properties of steels and cast irons are based on the influence of chemical composition and structure. The paper considers an approach that allows to evaluate the mechanical properties of rolling (C) cast iron rolls with a pearlitic (P) matrix depending on the complex influence of the elements of their chemical composition. **Materials and methods.** The working area of СПХН roll cast iron samples from the surface up to 50 mm doped with chromium (X) and nickel (H) was investigated. The carbide content varied from 10 to 15 %; and lamellar graphite did not exceed 2 %. **The results of the experiment.** In the work for modeling the mechanical characteristics of cast iron rolls used the method of planning experiments. The choice of this technique is due to the multi-parameter technology of production of solid metal casting. The application of this technique allowed to obtain models for predicting the mechanical characteristics of roll cast iron SPHN depending on the influence of the elements of the chemical composition of the rolls (C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni). The error in predicting the tensile strength  $\sigma_B$ , bending strength  $\sigma_{згин}$  bending and hardness according to the Shore HSD method did not exceed 5,89 %. When checking the models for convergence of results by Fisher's criterion at a critical value of  $F_{crit} = 2,400$  for  $\sigma_B$ , this coefficient was 1,249; for  $\sigma_{згин}$  fold was 1,289 and for HSD – 1,012. To analyze the effect of carbon on mechanical characteristics, two-dimensional dependence plots are constructed. **Conclusions.** Within the operating values of the parameters of the chemical composition of cast iron rolling mills СПХН-45 in accordance with existing regulations, a forecast of their mechanical characteristics within the allowable limits of error of experimental data. The results of the work allow to obtain mathematical models in the process of production of rolls of the СПХН brand to quickly establish their chemical composition within the standard technology in accordance with the customer's requirements for these mechanical characteristics. In addition, the obtained models can predict these characteristics of the manufactured rolls with minimal material and time costs.

**Keywords:** rolling mills; elements of chemical composition; mechanical characteristics; multiparameter technology

**Вступ.** Відомо, що основні параметри, які впливають на механічні характеристики валкового чавуну, це їх склад та структура [1–4]. Варіювання хімічним складом під час виробництва чавунних прокатних валків – один із підходів надання їм властивостей, що продиктовані нормативною базою і вимогами замовника.

У зв'язку з багатопараметричністю технологічного режиму їх виробництва властивості, що очікуються, та властивості, які отримують у готових валках, можуть суттєво відрізнятись [5–8]. Це пов'язано з тим, що навіть незначна зміна параметрів технології може сильно впливати на властивості (швидкість охолодження, склад, метод виготовлення та ін.) [9; 10].

Для вирішення питання керування та прогнозу властивостей металевих виробів застосовують різні підходи моделювання [11–15]. Серед них можна відмітити фрактальне моделювання структури та

властивостей матеріалів [16–19], застосування експертних оцінок у прогнозі властивостей [20; 21], методику оцінювання області компромісу властивостей цільового продукту [22; 23] та ін. Один із перспективних підходів – застосування методики планування експериментів для оперативного оцінювання необхідних критеріїв [24–27].

У роботі реалізовано матрицю планування експериментів, що описує вплив елементів хімічного складу масивних валків на їх механічні характеристики в робочій області параметрів виробництва згідно зі штатною технологією.

**Матеріали та методика.** Валки з чавуну СПХН-45 належать за призначенням до сортопрокатних (С), за формою графітних включень у структурі є пластинчастий графіт (П), поверхня робочого шару легована хромом (Х) та нікелем (Н) (рис. 1). Із чавуну СПХН-45 виготовляють валки чорнових клітей, дрібно-, середньосортних і

трубопрокатних станів; валки обтискних та чорнових клітей сортопрокатних станів.



Рис. 1. Чавунні валки [28]

У таблиці 1 наведено хімічний склад валкового чавуну виконання СПХН-45 після двох плавок. Валки не піддавалися окремій термічній обробці згідно з вимогою замовника.

Таблиця 1

**Хімічний склад чавунів (% від маси)**

№	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
1	3,03	0,85	0,73	0,12	0,035	0,76	1,17	0,30
2	2,95	0,75	0,62	0,11	0,035	0,73	1,12	0,26

Зразки для визначення міцності на згин  $\sigma_{згин}$  валкового чавуну СПХН виготовляли розмірами 10 мм × 10 мм × 90 мм, а для розрахунку показників  $\sigma_B$  – розмірами 25 мм × 50 мм.

Таблиця 2

**Твердість зразків, визначена методом Шора**

Валок 1		Валок 2	
№ зразка	Твердість робочої поверхні, HSD	№ зразка	Твердість робочої поверхні, HSD
1	48	1	47
2	49	2	49
3	46	3	46
4	48	4	48
5	47	5	47

Чавунний валок 1 марки СПХН-45 мав такі параметри: діаметр бочки 520 мм довжиною 1 000 мм (520 × 1 000 мм);

валок 2 тієї ж марки: діаметр бочки 680 мм довжиною 1 000 мм (680 × 1 000 мм).

У таблиці 2 наведено показники твердості зразків, визначені методом Шора (ГОСТ 23273-78) на Дніпровському заводі прокатних валків (ДЗПВ). Для отримання достовірних значень показників твердості сортопрокатних чавунних валків методом Шора контрольні заміри здійснювалися в трьох точках, що рівномірно розташовані по довжині бочки валка.

Структуру шліфів досліджували за допомогою металографічного мікроскопа Неофот-2 та переведенням в електронний вигляд фотознімків за допомогою цифрової камери “Olympus C-50” розміром 2 288 × 1 712 *рх*. Фотознімки мікроструктури досліджували в 256-колірному форматі \*bmp із градацією сірого кольору.

На рисунку 1 наведено мікроструктуру чавуну СПХН-45 за збільшення ×200. Аналіз мікроструктури показав, що ми маємо перлітний чавун, мікролегований хромом та нікелем, із пластинчастим графітом (до 2 %) та середнім умістом карбідів (цементиту ледебуритної евтектики  $Fe_3C$ ), значення займаної площі яких коливалися від 10 до 15 %.

Відбіленого шару (карбідів) на поверхні валкового чавуну виконання СПХН-45 методом оптичної мікроскопії не виявлено.

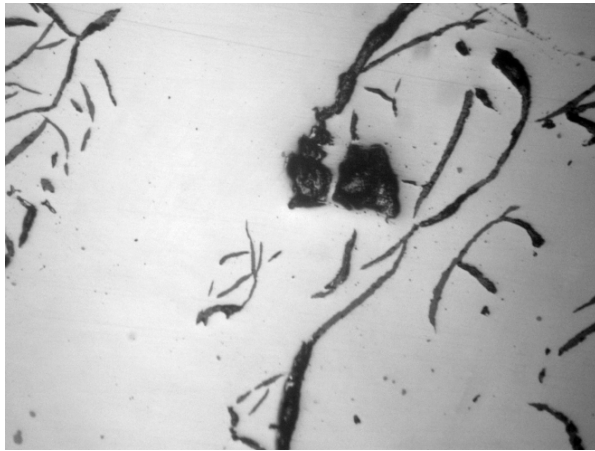
Отримані результати щодо хімічного складу, структури дають можливість провести планування експериментів із метою прогнозу механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків виконання СПХН-45.

**Результати експерименту.** Для економії матеріально-часових ресурсів, що затрачуються на проведення комплексу механічних випробувань, застосовувалася традиційна методика планування експериментів. Дослідження впливу елементів хімічного складу валкового чавуну на його механічні характеристики дозволяє отримувати багатопараметричні математичні моделі прогнозу цих характеристик.

Результати реального експерименту наведено у таблиці 3. Крім отриманих даних, застосовувалися статистичні показники механічних характеристик і хімічного складу

валкового чавуну, взяті з центральної заводської лабораторії по плавках за останні три-п'ять років (за період 2010–2014 років). Це великою мірою

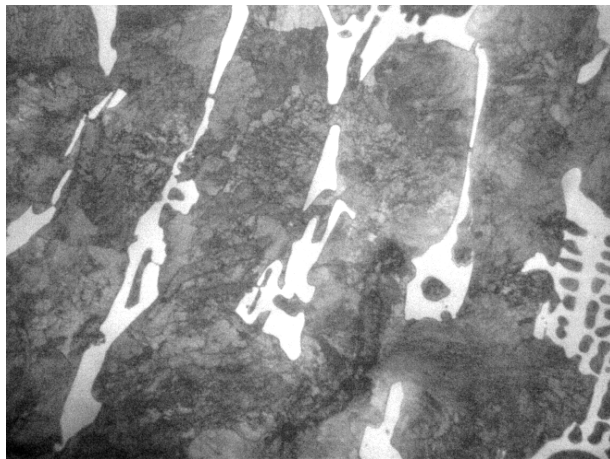
підвищує значимість та достовірність отриманих результатів і побудованих на їх аналізі моделей прогнозу даних механічних характеристик.



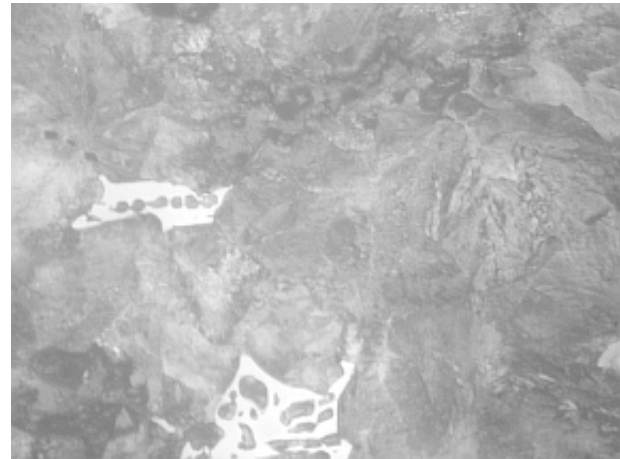
а



б



в



г

Рис. 2. Мікроструктура чавуну (5 мм від поверхні): пластинчастий графіт (а, б); цементит, графіт та перлітна матриця (в, г)

Для зручності розрахунків показники твердості валків, визначені за методикою Шора (HSD), переведено в показники твердості за Брінеллем (НВ).

Реалізовано дробовий факторний експеримент. Матриця планування експерименту складалася з  $2^4 = 16$  рядків. Функціями мети  $Y_{екс}$  виступали такі механічні характеристики:

- межа міцності на розтяг –  $\sigma_B$ ,
- межа міцності на згин –  $\sigma_{згин}$ ;
- показники твердості – НВ.

Показники функції  $Y_{роз}$  виступали оцінками їх прогнозу (див. табл. 3).

У таблиці 3 матриці планування наведено скорочення:

- ЗР – загальний рівень значень аргументів від  $X_1$  до  $X_7$ ;
- НР і ВР – нижній та верхній рівні значень аргументів відповідно;
- ІВ – інтервал варіювання елементів хімічного складу.

Як аргументи виступали такі елементи хімічного складу валкового чавуну виконання СПХН-45: вуглець ( $X_1$ ), кремній ( $X_2$ ), марганець ( $X_3$ ), фосфор ( $X_4$ ), сірка ( $X_5$ ) та легувальні елементи – хром ( $X_6$ ) й нікель ( $X_7$ ).

Таблиця 3

Матриця планування для чавунних валків марки СПХН /

ЗР	3,07	1,14	0,64	0,29	0,08	0,82	0,87							
ІВ	0,66	0,50	0,18	0,08	0,05	0,29	0,52							
НР	2,41	0,64	0,46	0,21	0,03	0,53	0,35							
ВР	3,73	1,64	0,82	0,37	0,13	1,11	1,39							
Позначення	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Твердість		σв		σ <sub>т<sub>лн</sub></sub>		
Розмірність	%	%	%	%	%	%	%	НВ		МПа		МПа		
1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13			
Код	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	Y <sub>1<sub>екс</sub></sub>	Y <sub>1<sub>роз</sub></sub>	Y <sub>2<sub>екс</sub></sub>	Y <sub>2<sub>роз</sub></sub>	Y <sub>3<sub>екс</sub></sub>	Y <sub>3<sub>роз</sub></sub>
1	+	+	+	+	+	+	+	+	248	248	405	439	713	760
2	+	+	+	+	-	+	+	-	255	255	448	414	773	726
3	+	+	+	-	+	+	-	+	255	258	460	426	790	743
4	+	+	+	-	-	+	-	-	255	252	520	554	873	920
5	+	+	-	+	+	-	+	+	255	252	520	536	873	899
6	+	+	-	+	-	-	+	-	249	252	624	608	1017	991
7	+	+	-	-	+	-	-	+	263	258	565	588	935	959
8	+	+	-	-	-	-	-	-	262	267	560	537	928	904
9	+	-	+	+	+	-	-	+	265	268	660	594	1067	972
10	+	-	+	+	-	-	-	-	285	282	422	488	737	832
11	+	-	+	-	+	-	+	+	285	285	554	556	920	919
12	+	-	+	-	-	-	+	-	285	286	603	601	988	989
13	+	-	-	+	+	+	-	+	277	277	624	640	1017	1039
14	+	-	-	+	-	+	-	-	284	284	645	629	1046	1024
15	+	-	-	-	+	+	+	+	260	258	500	550	850	928
16	+	-	-	-	-	+	+	-	265	267	550	500	950	873

У процесі реалізації матриці експерименту отримано математичні моделі прогнозу механічних характеристик валкового чавуну марки СПХН-45 (1–3).

Перевірку на збіжність отриманих результатів прогнозу механічних характеристик валкового чавуну виконували за допомогою відомого критерію Фішера при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ .

$$Y_{1_{роз}} = 265,500 \cdot X_0 - 10,250 \cdot X_1 + 1,125 \cdot X_2 - 0,750 \cdot X_3 - 2,000 \cdot X_4 - 3,125 \cdot X_5 - 2,625 \cdot X_6 + 1,875 \cdot X_7 - 1,500 \cdot X_3 \cdot X_4 - 1,875 \cdot X_4 \cdot X_6 - 2,750 \cdot X_5 \cdot X_6 + 4,375 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad R^2=0,88 \quad (1)$$

За критерієм Фішера модель адекватна:  $F_{набл} = 1,012 < F_{крит} = 2,400$ .

$$Y_{2_{роз}} = 541,250 \cdot X_0 - 28,500 \cdot X_1 - 32,250 \cdot X_2 + 2,250 \cdot X_3 - 5,250 \cdot X_4 - 22,250 \cdot X_5 - 27,500 \cdot X_6 - 20,625 \cdot X_7 + 14,000 \cdot X_3 \cdot X_4 + 24,000 \cdot X_4 \cdot X_6 - 15,750 \cdot X_5 \cdot X_6 + 9,250 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad R^2=0,83 \quad (2)$$

За критерієм Фішера модель адекватна:  $F_{набл} = 1,249 < F_{крит} = 2,400$ .

$$Y_{3_{роз}} = 904,813 \cdot X_0 - 42,063 \cdot X_1 - 47,188 \cdot X_2 + 0,563 \cdot X_3 - 9,188 \cdot X_4 - 28,313 \cdot X_5 - 35,688 \cdot X_6 - 26,688 \cdot X_7 + 21,313 \cdot X_3 \cdot X_4 + 31,313 \cdot X_4 \cdot X_6 - 19,313 \cdot X_5 \cdot X_6 + 10,188 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad R^2=0,75 \quad (3)$$

За критерієм Фішера модель адекватна:  $F_{набл} = 1,298 < F_{крит} = 2,400$ .

Розрахунки відносної похибки  $\varepsilon$  отриманих моделей прогнозу наведені в таблиці 4. Похибки  $\varepsilon$  розраховувались за такими формулами (4–6):

$$\varepsilon_1 = \frac{Y_{1\text{екс}} - Y_{1\text{роз}}}{Y_{1\text{екс}}}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{Y_{2\text{екс}} - Y_{2\text{роз}}}{Y_{2\text{екс}}}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{Y_{3\text{екс}} - Y_{3\text{роз}}}{Y_{3\text{екс}}}, \quad (6)$$

Результати свідчать, що в оцінюванні НВ середня похибка становить 0,79 %;  $\sigma_B$  – 5,89 % й  $\sigma_{\text{згин}}$  – 4,89 %. При цьому коефіцієнти парної кореляції  $R^2$  багатопараметричних рівнянь регресії (1–3), визначені за методикою найменших квадратів, коливались у діапазоні значень 0,75...0,88. Це вказує на їх можливість використання для прогнозу механічних характеристик чавунних сортопрокатних валків марки СПХН-45 у межах обраного хімічного складу згідно із заводською штатною технологією їх виробництва.

Таблиця 4

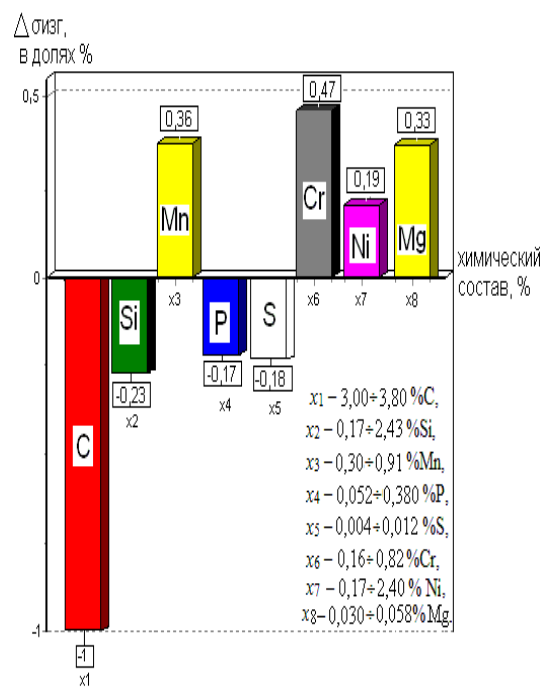
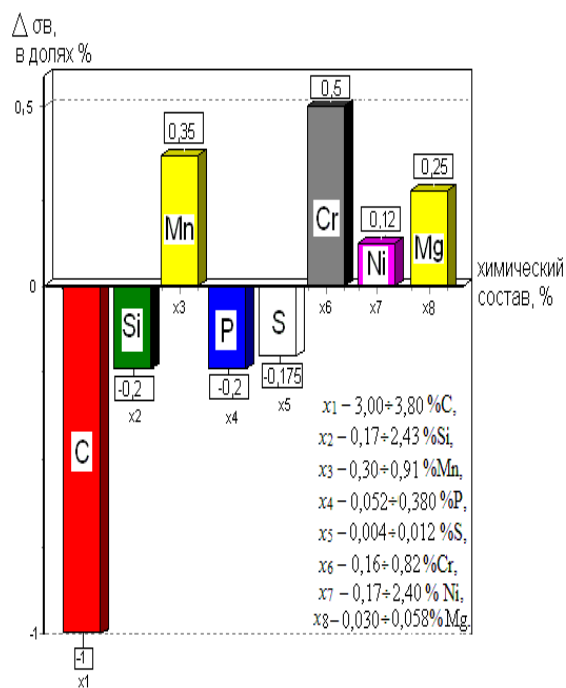
Результати механічних іспитів валкового чавуну марки СПХН-45 та показники їх прогнозу

№ з/п рядка матриці	$\sigma_B$ , МПа			$\sigma_{\text{згин}}$ , МПа			НВ		
	$Y_{1\text{екс}}$	$Y_{1\text{роз}}$	$\varepsilon_1$	$Y_{2\text{екс}}$	$Y_{2\text{роз}}$	$\varepsilon_2$	$Y_{3\text{екс}}$	$Y_{3\text{роз}}$	$\varepsilon_3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	405	439	0,0840	713	760	0,0659	248	248	0,0000
2	448	414	0,0759	773	726	0,0608	255	255	0,0000
3	460	426	0,0739	790	743	0,0595	255	258	0,0118
4	520	554	0,0654	873	920	0,0538	255	252	0,0118
5	520	536	0,0308	873	899	0,0298	255	252	0,0118
6	624	608	0,0256	1017	991	0,0256	249	252	0,0120
7	565	588	0,0407	935	959	0,0257	263	258	0,0190
8	560	537	0,0411	928	904	0,0259	262	267	0,0191
9	660	594	0,1000	1067	972	0,0890	265	268	0,0113
10	422	488	0,1564	737	832	0,1289	285	282	0,0105
11	554	556	0,0036	920	919	0,0011	285	285	0,0000
12	603	601	0,0033	988	989	0,0010	285	286	0,0035
13	624	640	0,0256	1017	1039	0,0216	277	277	0,0000
14	645	629	0,0248	1046	1024	0,0210	284	284	0,0000
15	500	550	0,1000	850	928	0,0918	260	258	0,0077
16	550	500	0,0909	950	873	0,0811	265	267	0,0075

Проведено аналіз впливу аргументів функції  $x_1 \dots x_7$  на досліджувані властивості валкового чавуну. Вплив елементів хімічного складу валкового чавуну на його властивості підтверджується їх фізико-хімічною взаємодією та описаний, наприклад, у працях [1–4].

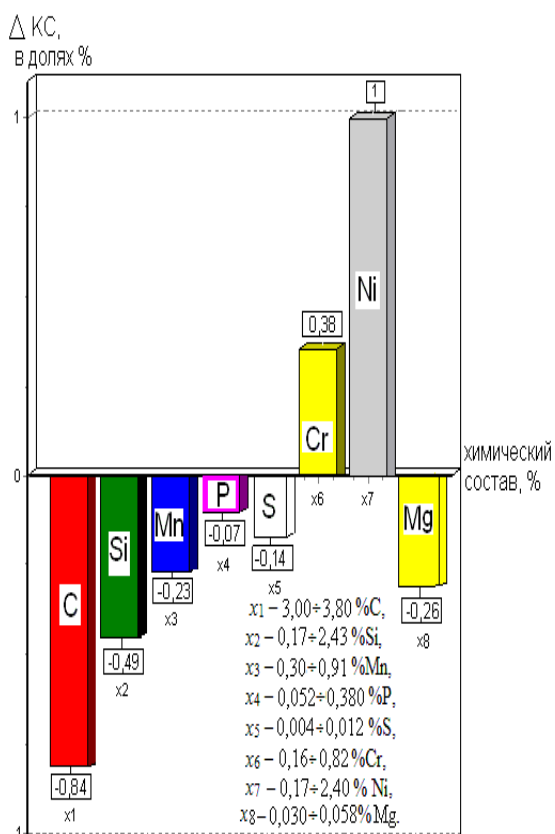
На рисунку 3 наведено вплив елементів хімічного складу на механічні характеристики валкового чавуну з пластинчастою формою графітних включень. У валках діаметром від 300 до 1

100 мм з перлітно-графітно-цементитним робочим шаром концентрацію вуглецю (X1) слід знижувати до < 2,8 %. Це зумовлено тим, що більша частина вуглецю йде на створення графітних включень і тому збільшення його змісту спричинює зниження міцності і пластичності (див. рис. [7]). Зв'язаний вуглець при вмісті до 1,2 % в легованому чавуні підвищує твердість і міцність, стабілізує перліт, збільшує кількість основної зміцнювальної фази і підвищує твердість та знижує пластичність чавуну, що підтверджується публікаціями [1–8; 29; 30].

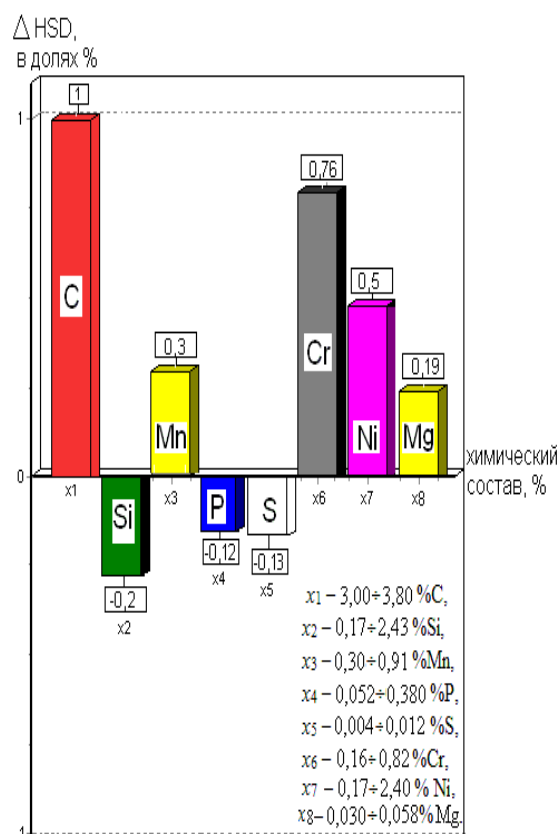


а

б



в



г

Рис. 3. Аналіз впливу хімічного складу на механічні властивості валкового чавуну СПХН [7]

У даному випадку вплив інших параметрів хімічного складу багатокритеріальної технології

виробництва прокатних валків, наведений в таблиці 4, позначається на точності показаних на рисунку 4 моделей.

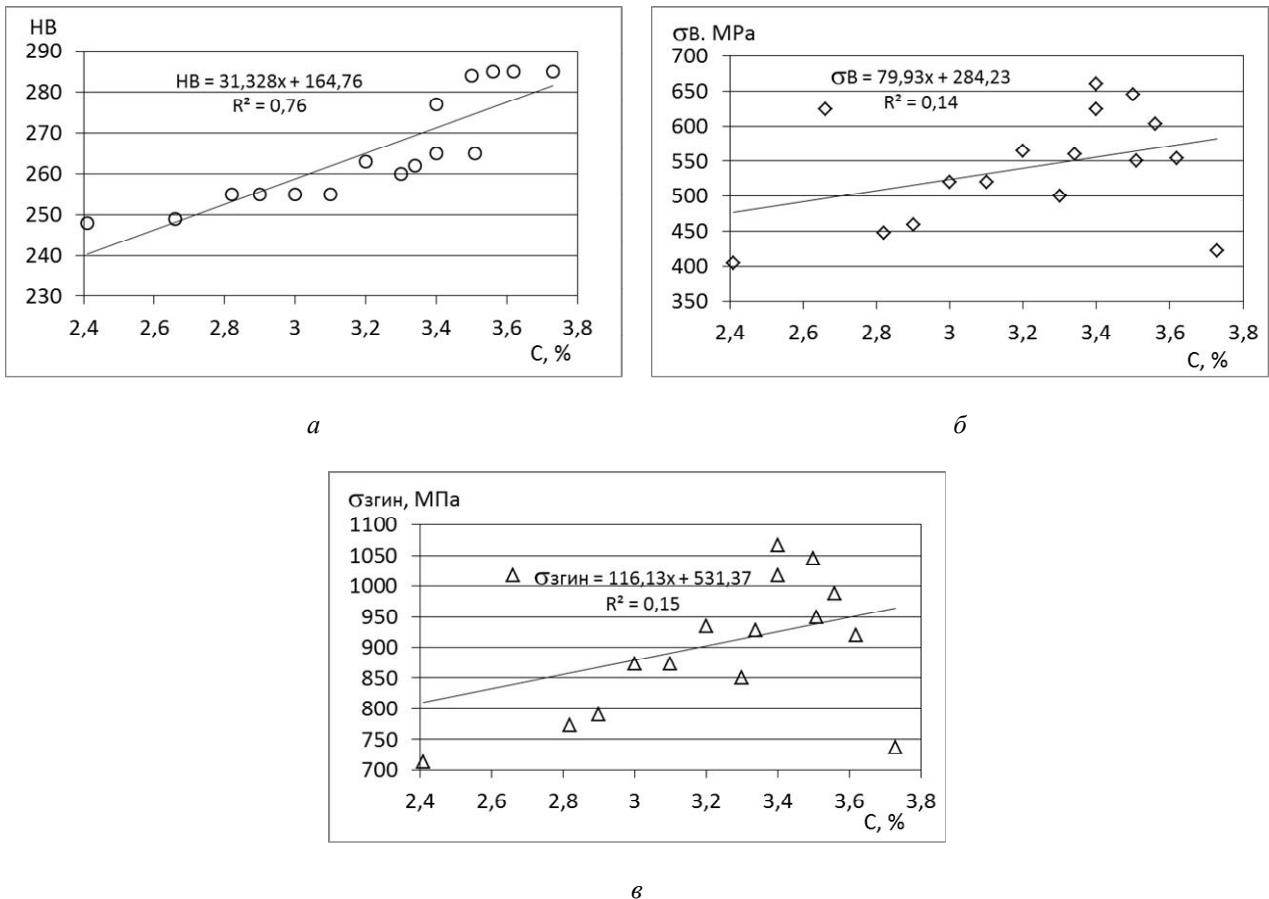


Рис. 4. Співвідношення між вуглецем валкового чавуну марки СПХН-45 і його механічними характеристиками

Слід зазначити, що залежно від зміни параметрів технології коефіцієнти рівнянь будуть змінюватися.

**Висновки.** Із застосуванням методики планування експериментів реалізовано оцінку механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків марки СПХН-45 без термічної обробки в робочій області обраних

параметрів (елементів хімічного складу) згідно з нормативними документами та штатною технологією виробництва. Побудовані моделі прогнозу механічних характеристик валкового чавуну дозволяють із мінімальними матеріально-часовими витратами проводити їх оцінювання на різних стадіях виробничого циклу.

## 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*. 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. *Металознавство 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 индентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с.
8. 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>
9. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165
10. Большаков Вад. І., Большаков В. І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. Системний аналіз технології виробництва масивного металевого 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. Saarbrucken : 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 СШХНФ-47. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.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-3bGcv-dG7CzYnmMh7KcVT>
15. 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>
16. Волчук В. М., Иванцов С. В., Тютюрев І. А. Дослідження впливу вуглецю на фрактальну розмірність сталі. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 3. С. 31–39. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.070720.31.638>
17. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In : *Materials Science Forum*. Vol. 968. Trans Tech Publications Ltd., 2019. 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., 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>
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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>
24. 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.
25. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L., 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>

26. 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>
27. 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 Savitskiy M. Dnipro : SHEE “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>
28. Волчук В. М., Штанденко М. С. Математична модель прогнозу якості металлу. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 2. С. 31–35. URL : <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290818.31.87>
29. 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>
30. 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

- Skoblo T.S., Vorontsov N.M., Budagyants N.A. and others. *Prokatnyye valki iz vysokouglerodistykh staley* [Rolling rolls made of high-carbon steels]. Moscow : Metallurgiya, 1994, 336 p. (in Russian).
- Krivocheev A.Yev. Cast rolls. Moscow : Metallurgy, 1957, 360 p. (in Russian).
- 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]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
- 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).
- 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 Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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 the Latest Technologies]. 2018, vol. 40, no 9, pp. 1165–1171.
- Bol'shakov Vad.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 Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 9, pp. 69–73. (in Ukrainian).
- 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.
- Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. Fractals and properties of materials. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
- Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkov СПХ-43 ta СШХФ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers СПХ-43 and СШХФ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian)
- 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. *Doslidzhennya vplyvu vuhletsyu na fraktal'nu rozmirnist' stali* [Study of the effect of carbon on the fractal dimension of steel]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 3, pp. 31–39. (in Russian).

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. 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* [Prospective Tasks of Engineering Science]. Edited by dr. sc. (tech.), prof. Bol'shakov V.I. Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, vol. 2. pp. 203–208. (in Russian).

21. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovanii aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie kachestva : mater. k 45-mu Mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : materials for the 45th International workshop on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa : Astroprint Publ., 2001, pp. 25–26. (in Russian).

22. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Opredele niye oblasti kompromissa kriteriyev kachestva chugunnykh valkov* [Scoping compromise quality criteria of cast iron rolls]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 11, pp. 4–7. (in Russian).

23. 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).

24. 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]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie kachestva : mater. k 45-mu Mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : materials for the 45th International workshop on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa : Astroprint Publ., 2001, pp. 25–26. (in Russian).

25. 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.

26. 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.

27. 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 State Academy of Civil Engineering and Architecture”. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, pp. 48–53.

28. 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 State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 2, pp. 31–35. (in Ukrainian).

29. 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 State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 9, pp. 9–14. (in Russian).

30. 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: 12.02.2021.