УДК 669.017:519.21
DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.260222.13.628

ВПЛИВ СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ НА ВЛАСТИВОСТІ МАСИВНИХ ВИРОБІВ

БОБРИК А. С., *магістр*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: asuvorova32@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3566-7676

Анотація. ***Вступ.*** Складність технології виробництва масивних металевих виробів, до яких належать чавунні прокатні валки, не дозволяє наперед точно прогнозувати їх механічні властивості. Тому більшість існуючих моделей прогнозування механічних властивостей прокатних валків засновані на статистичних даних експериментів та експертних оцінках. Запропоновано створити модель прогнозу механічних властивостей сортопрокатних валків шляхом оцінки їх хімічного складу та структури. ***Матеріали та методика.*** Як матеріал для дослідження обрано валковий чавун марки СПХН-49 та СПХН-45. Металографічний аналіз структури валків проводився згідно з Державним стандартом 3443. Встановлено, що вміст карбідів перебував у межах 8…14 %, пластинчастого графіту – 0,5…1,3 %. Довжина включень пластинчастого графіту відповідала балам ПГд45…ПГд180. ***Результати експерименту.*** Отримано моделі прогнозу механічних властивостей чавунних валків СПХН-49 та СПХН-45 залежно від їх хімічного складу та структури. Максимальна похибка у прогнозі $\sigma_В$ валків на основі аналізу елементів хімічного складу становить 2,40 %; $\sigma_{згин}$ – 5,85 %; КС – 5,81 % та HSD – 3,19 %. В оцінюванні механічних властивостей валків на основі аналізу елементів їх структури максимальні похибки прогнозу становили для $\sigma_В$ – 4,83 %; $\sigma_{згин}$ – 4,58 %; КС – 5,74 % та HSD – 2,81 %. Коефіцієнти парної кореляції R^2 отриманих моделей зафіксовані в межах 0,55…0,94, що свідчить про можливості застосування отриманих моделей як експрес-методики для оперативного визначення механічних властивостей валків СПХН-49 та СПХН-45 у робочій області параметрів. Побудовано гістограми впливу досліджуваних параметрів на механічні властивості. ***Висновки.*** В результаті дослідження робочої області параметрів хімічного складу та структури валків СПХН-49 та СПХН-45 отримано моделі прогнозу їх властивостей. Аналіз літературних джерел дозволив застосувати експертні оцінки для ранжування обраних параметрів.

Ключові слова: *чавунні валки; хімічний склад; механічні властивості; структура; модель; прогноз*

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА МАССИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

БОБРИК А. С., *магистр*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднипровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e- mail: asuvorova32@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3566-7676

Аннотация. ***Введение.*** Сложность технологии производства массивных металлических изделий, к которым относятся чугунные прокатные валки, не позволяет заранее точно прогнозировать их механические свойства. Поэтому большинство существующих моделей прогнозирования механических свойств прокатных валков основаны на статистических данных экспериментов и экспертных оценках. Предлагается создать модель прогноза механических свойств сортопрокатных валков путем оценки их химического состава и структуры. ***Материалы и методика.*** В качестве материала для исследования выбран валковый чугун марки СПХН-49 и СПХН-45. Металлографический анализ структуры валков проводился согласно с Государственным стандартом 3443. Установлено, что содержание карбидов находилось в пределах 8...14 %, пластинчатого графита – 0,5...1,3 %. Длина включений пластинчатого графита соответствовала баллам ПГд45...ПГд180. ***Результаты эксперимента.*** Получены модели прогноза механических свойств чугунных валков СПХН-49 и СПХН-45 в зависимости от их химического состава и структуры. Максимальная погрешность при прогнозе $\sigma_В$ валков на основе анализа элементов химического состава составляет 2,40 %; $\sigma_{изг}$ – 5,85 %; КС – 5,81 % и HSD – 3,19 %. При оценке механических свойств валков на основе анализа элементов их структуры максимальные погрешности прогноза составляли для $\sigma_В$ – 4,83 %; $\sigma_{изг}$ – 4,58 %; КС – 5,74 % и HSD – 2,81 %. Коэффициенты парной корреляции R^2 полученных моделей зафиксированы в пределах 0,55...0,94, что свидетельствует

о возможности применения полученных моделей в качестве экспресс-методики для оперативного определения механических свойств валков СПХН-49 и СПХН-45 в рабочей области параметров. Построены гистограммы влияния исследуемых параметров на механические свойства. ***Выводы.*** В результате исследования рабочей области параметров химического состава и структуры валков СПХН-49 и СПХН-45 получены модели прогноза их свойств. Анализ литературных источников позволил применить экспертные оценки для ранжирования выбранных параметров.

Ключевые слова: *чугунные валки; химический состав; механические свойства; структура; модель; прогноз*

IMPACT OF THE COMPOSITION AND STRUCTURES ON THE PROPERTIES OF MASSIVE PRODUCTS

BOBRYK A.S., *Master of Engineering*

Department of Materials Science, State Higher Education Institution "Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: asuvorova32@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3566-7676

Abstract. ***Introduction***. The complexity of production technology of massive metal products, which include cast iron rolls, does not allow predicting accurately their mechanical properties in advance. Therefore, most existing models for predicting the mechanical properties of rolling rolls are based on experiment statistics and expert estimates. It is proposed to create a model for forecasting the mechanical properties of rolling mills by evaluating their chemical composition and structure. ***Materials and methodology.*** Roller cast iron of the СПХН-49 and СПХН-45 brand was selected as the study material. Metallographic analysis of the rolls structure was carried out in accordance with the State Standard 3443. It was found that the carbide content was in the range of 8… 14 %, plate graphite – 0,5… 1,3 %. The length of inclusions of graphite corresponded to a score of ПГД45…ПГД180. ***The results of the experiment.*** Prediction models of mechanical properties of cast iron rolls СПХН-49 and СПХН-45 depending on their chemical composition and structure were obtained. The maximum error in the prediction of σ_B rolls based on the analysis of chemical composition elements is 2,40 %; $\sigma_{изг}$ – 5,85 %; KC – 5,81 % and HSD – 3,19 %. When estimating the mechanical properties of the rolls, based on the analysis of the elements of their structure, the maximum prediction errors were 4,83 % for σ_B – 4,83 %; $\sigma_{изг}$ – 4,58 %; KC – 5,74 % and HSD – 2,81 %. The pair correlation coefficients R^2 of the obtained models are fixed within 0,55...0,94, which indicates the possibility of using the obtained models as an express method for the rapid determination of the mechanical properties of rolls СПХН-49 and СПХН-45 in the working range of parameters. Histograms of the influence of the studied parameters on the mechanical properties are constructed. ***Conclusions.*** As a result of the study of operating range parameters of the chemical composition and structure of the rolls СПХН-49 and СПХН-45, the forecast models of their properties are obtained. The analysis of the literature has allowed the use of expert estimates to rank the selected parameters.

Keywords*: cast iron rolls; chemical composition; mechanical properties; structure; model; forecast*

Вступ. Оцінювання механічних властивостей масивних виробів завжди ускладнене багатопараметричністю та багатокритерійністю технології їх виробництва [1; 2]. Стохастичні зміни критеріїв якості чавунних валків, що належать до масивних металевих виробів, залежать від зміни параметрів технології їх виробництва: хімічного складу; температури заливки чавуну, швидкості охолодження, способу виготовлення (наприклад, звичайне або відцентрове лиття), маси відливки (багатотонажний об'єкт, технологічний процес охолодження якого становить від 1 до 3 діб) [1−5]. Усі ці параметри істотно впливають на критерії якості цільового продукту.

Хімічний склад і структура литих сортопрокатних чавунних валків − основні фактори, що визначають їх фізико-механічні властивості [3; 6; 7]. Тому для оперативного оцінювання властивостей масивних валків широко застосовують емпіричні моделі [8−10], включаючи фрактальне моделювання структури та властивостей різних матеріалів [11−14]. Наприклад, у [15; 16] для прогнозу критеріїв якості матеріалів застосовували системний підхід; експертний підхід [17; 18]. Для прогнозу критеріїв якості матеріалів користуються методикою планування експериментів [19−21]. Її застосування дає

можливість досліджувати та оптимізовувати багатопараметричні технології.

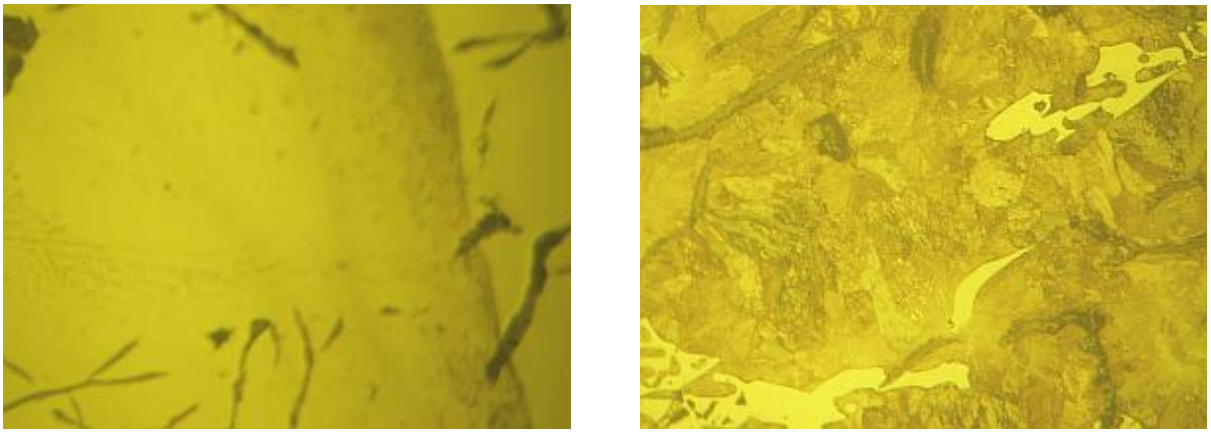
Із метою дослідження впливу хімічного складу та структури чавунних прокатних валків на їх механічні характеристики у статті запропоновано застосовувати математичне моделювання. Такий підхід дасть можливість визначити механічні властивості валків у робочій області параметрів та кількісно оцінити «вагу» їх впливу.

Матеріали та методика. Як матеріал для дослідження обирали по шість чавунних валків виконання СПХН-49 та СПХН-45 виробництва Дніпровського заводу прокатних валків, м. Дніпро (рис. 1). Маса валків становила 3…5 т. Із цієї марки чавуну виробляють сортопрокатні (С) валки, що мають у структурі пластинчастий графіт – П. Для поліпшення експлуатаційних характеристик валків їх легують Cr (Х) та Ni (Н). Валки експлуатуються в основному в передчистових клітях крупносортних, трубопрокатних та рельсобалкових станів металургійних підприємств, тому мають витримувати значні перепади температури та тиску.

Досліджуваний хімічний склад валків виконання СПХН-49 та СПХН-45 змінювався в таких межах згідно з ТУ У 27.5-24608640-002:2008: 3,10...3,30 %C; 0,70...0,85 %Si; 0,70...0,76 %Mn; 0,61...0,76 %Cr; 0,90...1,17 %Ni; 0,115…0,30 %P; 0,035...0,055 %S.

Рис. 1. Чавунні сортопрокатні валки СПХН / Fig. 1. Cast iron rolling mills СПХН

Під час визначення ударної в'язкості чавуну використовували зразки без надрізу, що мали розміри 10 × 10 × 55 *мм*. Показники міцності чавуну на згин визначали на зразках розмірами 10 × 10 × 90 *мм*, а для визначення міцності на розтяг – зразки розмірами 25 × 50 *мм*.



а *б (b)*

Рис. 2. Мікроструктура робочого шару бочок валкового чавуну (10 мм від поверхні): пластинчастий графіт (а); колонії ледебуриту, пластинчастого графіту та перлітної матриці / Fig. 2. Microstructure of the working layer of roll cast iron barrels (10 mm from the surface): plate graphite (a); colonies of ledeburite, plate graphite and pearlite matrix

Структуру валкового чавуну виконання СПХН-49 та СПХН-45 вивчали за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-6 при збільшенні 200. В результаті металографічного аналізу структури робочої зони бочок установлено, що вміст карбідів змінювався в межах 8…14 %, пластинчастого

графіту – в діапазоні 0,5…1,3 %. Бал пластинчстого графіту перебував у межах ПГд45…ПГд180 згідно з Державним стандартом 3443.

Результати експерименту. Базуючись на літературному огляді багатопараметричної технології виробництва валків, прийняли обрати як параметри для дослідження елементи їх хімічного складу та структури (рис. 3). Дослідження за допомогою математичного апарату робочої області обраних параметрів та критеріїв якості (в даному випадку механічних властивостей валкового чавуну виконання СПХН-49 та СПХН-45) дало можливість побудувати моделі прогнозу цих критеріїв.

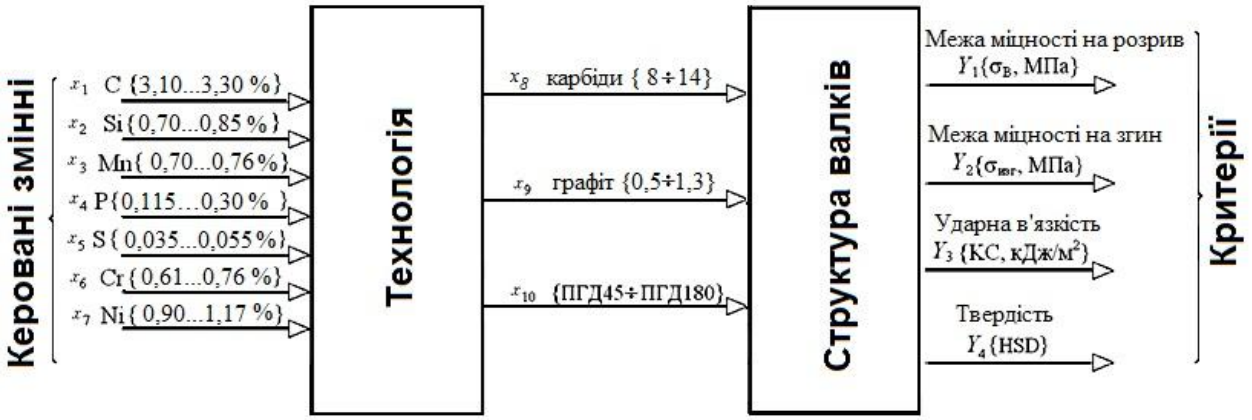


Рис. 3. Структурна схема вибору параметрів технології для дослідження /
Fig. 3. Block diagram of the choice of technology parameters for research

З використанням регресійного аналізу отримано лінійні моделі прогнозу механічних властивостей Y_1, Y_2, Y_3 та Y_4 робочого шару валків виконання СПХН-49 та СПХН-45 (1−8). Результати аналізу рівнянь (1−4) наведені в таблиці, де $Y_{1ек}$, $Y_{2ек}$, $Y_{3ек}$, $Y_{4ек}$ – значення механічних властивостей, отриманих у результаті експерименту (натурних іспитів); $Y_{1роз}$, $Y_{2роз}$, $Y_{3роз}$, $Y_{4роз}$ – розрахункові значення механічних властивостей, отриманих за допомогою рівнянь.

$$Y_1 = 273{,}12 - 24{,}59\cdot x_1 + 29{,}86\cdot x_2 - 229{,}18\cdot x_3 + 18{,}66\cdot x_4 - 605{,}28\cdot x_5 + 325{,}49\cdot x_6 + 54{,}65\cdot x_7; \quad R^2=0{,}94 \quad (1)$$

$$Y_2 = 2242{,}65 - 47{,}16\cdot x_1 - 505{,}41\cdot x_2 - 965{,}44\cdot x_3 - 382{,}59\cdot x_4 - 5487{,}30\cdot x_5 - 414{,}85\cdot x_6 + 59{,}53\cdot x_7; \quad R^2=0{,}87 \quad (2)$$

$$Y_3 = 1{,}33 - 0{,}62\cdot x_1 + 7{,}19\cdot x_2 + 28{,}17\cdot x_3 - 15{,}59\cdot x_4 + 63{,}49\cdot x_5 - 2{,}13\cdot x_6 - 3{,}38\cdot x_7 \quad R^2=0{,}68 \quad (3)$$

$$Y_4 = 94{,}22 - 2{,}93\cdot x_1 - 18{,}54\cdot x_2 + 2{,}89\cdot x_3 - 38{,}60\cdot x_4 + 128{,}17\cdot x_5 - 23{,}34\cdot x_6 - 6{,}63\cdot x_7 \quad R^2=0{,}70 \quad (4)$$

$$Y_1 = 283{,}30 + 6{,}51\cdot x_8 - 56{,}90\cdot x_9 + 0{,}02\cdot x_{10}; \quad R^2=0{,}84 \quad (5)$$

$$Y_2 = 534{,}71 - 1{,}88\cdot x_8 - 157{,}34\cdot x_9 + 0{,}44\cdot x_{10}; \quad R^2=0{,}78 \quad (6)$$

$$Y_3 = 20{,}84 + 0{,}12\cdot x_8 - 2{,}10\cdot x_9 + 1{,}4\cdot 10^{-6}\cdot x_{10}; \quad R^2=0{,}55 \quad (7)$$

$$Y_4 = 57{,}57 - 0{,}58\cdot x_8 - 6{,}46\cdot x_9 + 0{,}02\cdot x_{10}. \quad R^2=0{,}59 \quad (8)$$

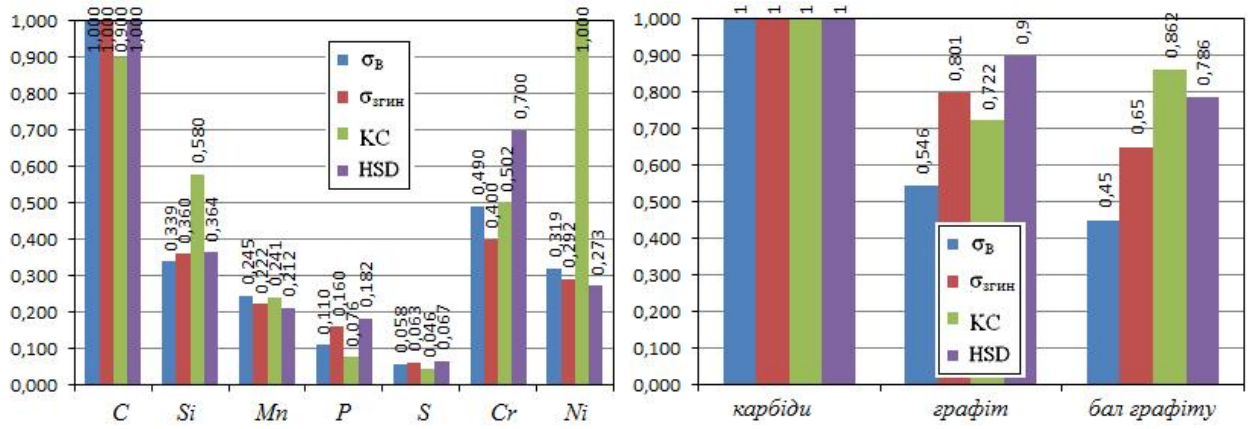
Із даних таблиці випливає, що максимальна відносна похибка у прогнозі $\sigma_В$ становить 2,40 %; $\sigma_{згин}$ – 5,85 %; КС – 5,81 % та HSD – 3,19 %. Під час оцінювання механічних властивостей чавуну на основі результатів моделей (5−8) установлено, що максимальні похибки прогнозу складають для $\sigma_В$ – 4,83 %; $\sigma_{згин}$ – 4,58 %; КС – 5,74 % та HSD – 2,81 %. За цих обставин коефіцієнти парної кореляції R^2 моделей (1−8) змінювались від 0,55 до 0,94, що свідчить про можливості їх застосування для оперативного визначення механічних властивостей валків СПХН-49 та СПХН-45 в діапазоні значень обраних параметрів.

Таблиця

Результати натурних іспитів валків СПХН-49 і СПХН-45 та їх прогнозу / Results of field tests of rolls СПХН-49 and СПХН-45 and their forecast

n/n	σ_B, МПА			$\sigma_{згин}$, МПа			КС, кДж/м^2			Твердість, HSD		
	$Y_{1ек}$	$Y_{1роз}$	Похибка, %	$Y_{2ек}$	$Y_{2роз}$	Похибка, %	$Y_{3ек}$	$Y_{3роз}$	Похибка, %	$Y_{4ек}$	$Y_{4роз}$	Похибка, %
1	320	321	0,33	440	441	0,14	21	21	0,37	49	49	0,52
2	320	318	0,69	435	435	0,01	21	21	0,01	49	49	0,29
3	310	311	0,18	430	430	0,09	20,5	20,2	1,25	48	48	0,48
4	300	303	0,88	420	417	0,68	20	20	1,96	48	48	0,66
5	300	297	0,99	420	419	0,31	20	20	0,74	47	48	1,40
6	290	289	0,36	390	408	4,52	21	20	5,81	47	47	0,73
7	280	287	2,40	440	414	5,85	19	20	3,40	46	47	3,19
8	350	349	0,29	480	484	0,77	21	21	0,16	46	46	0,52
9	290	292	0,59	390	382	2,04	20	20	0,63	47	47	0,79
10	280	278	0,55	380	388	2,12	20	20	1,04	47	47	0,62
11	290	291	0,22	400	397	0,84	19	19	0,58	46	46	0,34
12	280	275	1,61	380	391	2,85	19	19	1,13	46	47	2,18

Шляхом аналізу коефіцієнтів рівнянь регресії (1−8) та експертної оцінки [1; 2; 5] побудовані діаграми, що описують вплив («вагу») кожного обраного параметра $x_1 \ldots x_{10}$ на функцію мети $Y_1 \ldots Y_4$.



а *б (b)*

Рис. 4. Гістограми впливу елементів хімічного складу (а) та структури (б) валків СПХН-49 на їх механічні властивості / Fig. 4. Histograms of the influence of elements of chemical composition (a) and structure (b) of rolls СПХН-49 on their mechanical properties

Вплив кожного з параметрів $x_1 \ldots x_{10}$ на механічні властивості чавуну підтверджується механізмом їх фізико-хімічної взаємодії, що детально описана у працях [1−4].

Висновки. Проведено кількісне оцінювання впливу складу та структури сортопрокатних чавунних валків виконання СПХН-49 та СПХН-45 на їх механічні властивості (σ_B, $\sigma_{згин}$, КС та HSD). Отримані моделі (1−4) та гістограму впливу хімічного складу на механічні властивості можна застосовувати на передпроектній стадії оцінювання цих властивостей, або в процесі виробництва валків. Після закінчення основного циклу виробництва валків результати прогнозу їх механічних властивостей можна коригувати шляхом

застосування отриманих моделей (5−8) та балової оцінки включень графіту). впливу елементів структури (карбідів, графіту

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кривошеев А. Е. Литые валки : монография. Москва : Металлургиздат, 1957. 360 с.

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

3. 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.

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 чугунных 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. *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. URL: https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects

8. 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

9. 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

10. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Применение теоретико-информационного подхода для идентификации структуры металла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 8. С. 4–9. URL: http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/4134

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. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий. *Металлофизика и новейшие технологии.* 2017. Т. 39. № 3. С. 949−957. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/130334

13. 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

14. 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

15. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskyi 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

16. 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

17. 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

18. Bolshakov V. I., 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 : Karabuk University, 2019 (Turkey). Vol. 4. Pp. 415−417. URL: https://drive.google.com/open?id=1jfWwEhSuRl-3bGcv-dG7CzYnmMh7KcVT

19. 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.

20. 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.

21. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O., Soldo B. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. *Technical Journal.* 2017. Vol. 11, № 3. Pp. 121–124. URL: https://hrcak.srce.hr/186657

REFERENCES

1. Krivosheev A. E. Cast rolls. Moscow : Metallurgy, 1957, 360 p. (in Russian).

2. 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).

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]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [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 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).

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 Prydniprovska 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.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.

9. Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva masyvnoho 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).

10. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye teoretiko-informatsionnogo podkhoda dlya identifikatsii struktury metalla* [The use of information – theoretic approach to identify the structure of the metal]. *Visnyk Prydniprovs'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).

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. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).

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

14. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv СПХН-43 та СШХНФ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers СПХН-43 and СШХНФ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian)

15. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskyi 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.

16. Lyashenko T., Voznesensky V. and Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. In: International symposium on brittle matrix composites. 2000, pp. 210−219.

17. Volchuk V. and Tokosov S. *Sposib prohnozu mekhanichnykh vlastyvostey chavunnykh valkiv* [Method of forecasting mechanical properties of cast-iron rolls]. ScienceRise. 2018, vol. 11. pp. 57–61. (in Ukrainian).

18. 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.

19. 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]. Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, vol. 2. pp. 203–208. (in Russian).

20. 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]. The modeling and optimization in materials science : proc. of 40th Int. Conf. Odessa, 2001, pp. 25–26. (in Russian).

21. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O. and Soldo B. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. Technical Journal. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124.

Надійшла до редакції: 02.02.2020