

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.281221.33.822

**ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ВУГЛЕЦЮ НА СТРУКТУРУ ВАЛКІВ**ВОЛЧУК В. М.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, доц.*,КОТОВ М. А.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,ШТАНДЕНКО А. С.<sup>3</sup>, *ліцеїст*

<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), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>2</sup> Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (097) 261-85-34, e-mail: [kotov.nykolay@pgasa.dp.ua](mailto:kotov.nykolay@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0233-0663

<sup>3</sup> Київський природничо-науковий ліцей № 145, вул. Шота Руставелі, 46, Київ-23, 03023, Україна, тел. +38 (044) 287-11-49, e-mail: [kpn145.62@gmail.com](mailto:kpn145.62@gmail.com)

**Анотація. Вступ.** Актуальність прогнозу механічних властивостей чавунних сортопрокатних валків диктується складною періодичною технологією їх виробництва. Прогноз критеріїв якості валків, як показує огляд літературних джерел, можливий за наявності системного підходу. Системний підхід включає в себе аналіз найбільш важливих параметрів, що впливають на механічні та службові показники масивних валків. До таких параметрів безумовно належить їх хімічний склад та структура. Запропоновано дослідити вплив вуглецю на структуру та властивості чавунних валків із використанням теорії фракталів. **Матеріали та методи.** Досліджувалися сортопрокатні чавунні валки з перлітною матрицею. До складу валків входили карбіди (до 2,5 %) та включення кулястого графіту (до 2,5 %) завдяки присадці магнію в межах експерименту від 0,038 до 0,054 %. Для виготовлення валків марки СШХН застосовували такі модифікатори: Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, VI 57 (M), Varinos, Elgraf. Структура валків досліджувалась за збільшення у 200 разів. **Результати експерименту.** Визначення фрактальної розмірності елементів структури чавунних валків проводилося за запатентованою методикою, яка побудована на визначенні клітинної та точкової дробових розмірностей. Зафіксовано, що зі збільшенням вмісту магнію показники фрактальної розмірності кулястого графіту збільшуються до його топологічної розмірності 2. За зростання показників міцності та ударної в'язкості і зменшення значень твердості показники вмісту вуглецю та фрактальної розмірності карбідів зменшуються. Шляхом співставлення значень фрактальної розмірності кулястого графіту, карбідів у вигляді цементиту ледебуритної евтектики зі значеннями вуглецю та механічних властивостей (міцності, ударної в'язкості та твердості) отримано рівняння регресії з коефіцієнтами кореляції  $R^2 = 0,82...0,94$ . Ці рівняння можна навести у вигляді моделей прогнозу механічних властивостей чавунних валків СШХН. **Висновки.** Цінність отриманих результатів визначається встановленими зв'язками між вмістом вуглецю, структурою та властивостями чавуну. Із застосуванням фрактального підходу побудовано лінійні моделі оцінки механічних властивостей валків СШХН. Максимальні та мінімальні значення відносної похибки прогнозу властивостей перебувають у діапазоні значень 2,4...7,8 %.

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

**ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF CARBON ON THE STRUCTURE OF ROLLS**VOLCHUK V. M.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,KOTOV M. A.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,SHTANDENKO A. S.<sup>3</sup>, *Lyceum Student*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science, 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), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

<sup>2</sup> Department of Reinforced-Concrete and Masonry Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (097) 261-85-34, e-mail: [kotov.nykolay@pgasa.dp.ua](mailto:kotov.nykolay@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0233-0663

<sup>3</sup> Kyiv Natural Science Lyceum no. 145, 46, Shota Rustaveli Str., Kyiv-23, 03023, Ukraine, tel. +38 (044) 287-11-49, e-mail: [kpn145.62@gmail.com](mailto:kpn145.62@gmail.com)

**Abstract. Introduction.** The urgency of forecasting the mechanical properties of cast iron rolls is dictated by the complex periodic technology of their production. The forecast of quality criteria of rolls, as the review of literature sources shows, is possible in the presence of the system approach. The systems approach includes the analysis of the most important parameters influencing mechanical and service indicators of massive rolls. Such parameters certainly include their chemical composition and structure. It is proposed to investigate the influence of carbon on the structure and properties of cast iron rolls using fractal theory. **Materials and methods.** Varietal rolled cast iron rolls with a pearlitic matrix were studied. The rolls included carbides (up to 25 %) and the inclusion of spherical graphite (up to 2,5 %) due to the addition of magnesium within the experiment from 0.038 to 0.054 %. The following modifiers were used in the manufacture of СШХН rolls: Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, V1 57 (M), Barinoc, Elgraf. The structure of the rolls was studied at a magnification of 200 times. **The results of the experiment.** Determination of the fractal dimension of the elements of the structure of cast iron rolls was performed by a patented method, which is based on the determination of cellular and point fractional dimensions. It has been observed that with increasing magnesium content, the fractal dimension of spherical graphite increases to its topological dimension 2. With increasing strength and toughness and decreasing hardness values, the carbon content and fractal dimension of carbides decrease. By comparing the values of the fractal dimension of spherical graphite, carbides in the form of cementite ledeburite eutectic with the values of carbon and mechanical properties (strength, toughness and hardness) obtained regression equations with correlation coefficients  $R^2 = 0,82 \dots 0,94$ . These equations can be represented in the form of models for predicting the mechanical properties of cast iron rolls СШХН. **Conclusions.** The value of the results is determined by the established relationships between carbon content, structure and properties of cast iron. Using a fractal approach, linear models for estimating the mechanical properties of СШХН rolls are constructed. The maximum and minimum values of the relative error of the prediction of properties are in the range of values 2,4... 7,8 %.

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

**Вступ.** Прокатні валки з чавуну з кулястою формою графітних включень часто використовуються на різноманітних сортопрокатних, трубопрокатних та рейко-балкових станах. Їх застосовують для виготовлення відповідальної металопродукції: балки, рейки, труби, швелери, кутки, шпунти та ін. металургійного сортаменту [1; 2]. Сама технологія виробництва чавунних валків належить до періодичної, з відносно великим числом параметрів (хімічний склад, умови охолодження металу, спосіб виготовлення), частина з яких може змінюватися у відносно широкому діапазоні значень [3–8]. Цей факт значною мірою впливає на службові та механічні властивості чавунних прокатних валків, які також, у зв'язку з можливою зміною технологічних параметрів у межах штатної технології, можуть суттєво змінювати свої числові значення [9; 10].

Наразі широкого застосування для контролю якості матеріалів різного призначення набули математичні підходи [11–17]. Вони здебільшого ґрунтуються на емпіричних моделях та статистичних даних. Їх точність залежить від вибірки статистичних даних, чутливості вимірювальної апаратури та навиків

дослідників. Застосування цих підходів дозволяє модернізувати деякі технологічні процеси, поповнювати існуючі бази даних із моделями прогнозу, проводити експрес-аналіз того чи іншого критерію якості матеріалу тощо [18–25].

Серед математичних методів моделювання структури та властивостей об'єктів різної природи на особливу увагу заслуговує застосування фрактальної (дробової) геометрії Б. Мандельброта [26]. Застосування мови фрактального формалізму допомагає у розв'язуванні як загальнонаукових, так і актуальних прикладних задач сучасного матеріалознавства: в атомній енергетиці [27; 28]; у прогнозі механічних характеристик сортопрокатних чавунних валків різного виконання [29–31]; моделюванні структури та властивостей низьколегованих низьковуглецевих сталей [32–36]; бетонів [37–39]; тонких металевих плівок [40].

Проведено дослідження впливу вуглецю на структуру та властивості сортопрокатних чавунних валків із кулястою формою графіту із застосуванням як традиційних підходів (спектрального аналізу, оптичної мікроскопії, механічних іспитів), так і фрактальної геометрії.

**Матеріали та методика.** Сортопрокатні чавунні валки з кулястою формою графіту, леговані хромом та нікелем, маркуються як СШХН. Прокатні валки для обтискних та чорнових станів, що виготовляються з чавуну з кулястою формою графіту, мають у 1,5...2,5 рази вищі показники стійкості порівняно з валками із чавуну, що має включення з пластинчастою формою графіту та майже в 2,5...3 рази вищі порівняно з валками, виготовленими з традиційних високовуглецевих марок сталей [1; 2].



Рис. 1. Чавунний валок

Таблиця 1

Хімічний склад валків СШХН (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
3,00	1,45	0,45	0,04	0,004	0,60	0,70
...	...	...	...	...	...	...
3,40	1,80	0,65	0,20	0,010	0,90	1,30

У таблиці 1 наведено хімічний склад робочої зони валків виконання СШХН виробництва ВАТ «Дніпровський завод прокатних валків», м. Дніпро.

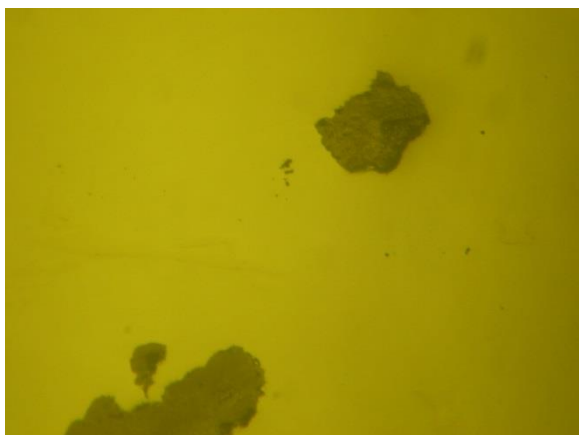
Досліджуваний валковий чавун не був термічно обробленим.

Механічні властивості валкового чавуну визначалися на стандартному обладнанні з використанням машин «INSTRON» та ЦД-40, маятникового копра ПСВ 5, склероскопа Шора (для вимірювання показників твердості).

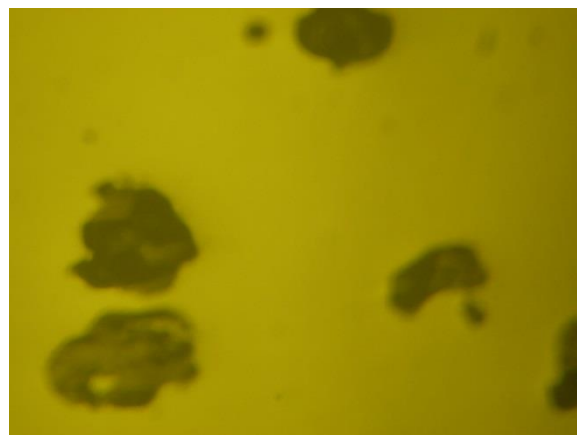
Для виявлення структури зразки чавуну виконували технологічні операції полірування, шліфування та травлення в спиртовому розчині  $\text{HNO}_3$ .

Мікроструктуру робочої зони валків виконання СШХН досліджували за збільшення 200 до процедури травлення на виявлення форми включень графіту (рис. 2 а, б) та після травлення на виявлення структури (рис. 2 в, г). Валковий чавун мав у своїй основі перлітну матрицю із середнім умістом карбідів (до 25 %) та до його складу входили включення кулястого графіту (до 2,5 %) завдяки присадці магнію в межах експерименту від 0,038 до 0,054 %. Для відливки сортопрокатних валків виконання СШХН застосовували такі модифікатори: Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, VI 57 (M), Varinos, Elgraf.

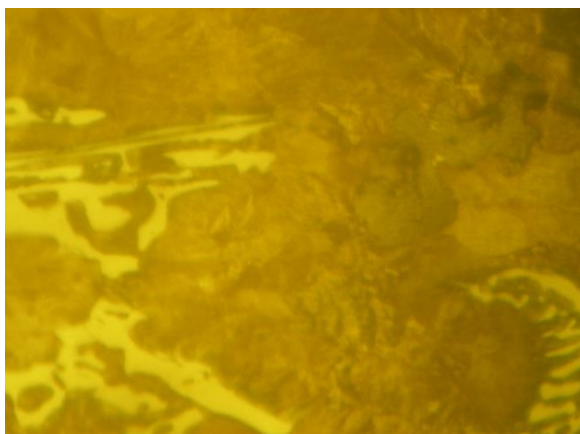
Для подальших розрахунків обирали дані по 16 проведених експериментах, в яких визначались такі механічні характеристики валків: межа міцності на розрив, межа міцності на згин, ударна в'язкість і твердість за Шором. За результатами дослідження структури визначали фрактальну розмірність її складових (включень кулястого графіту та карбідів).



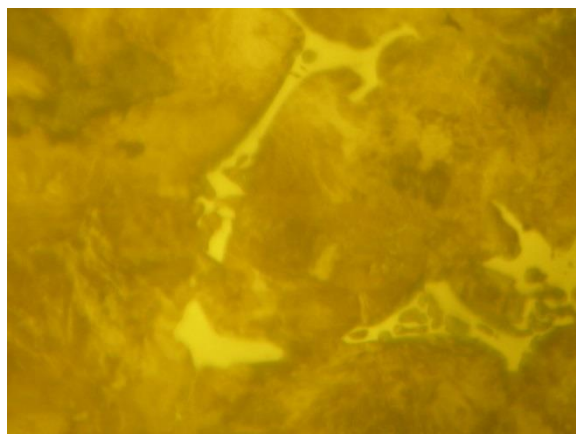
а



б

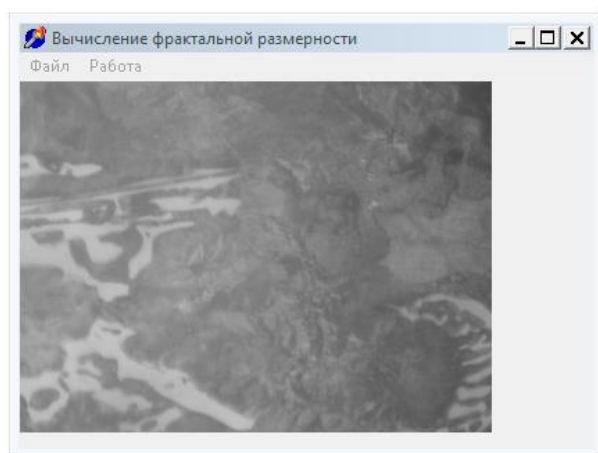


а



б

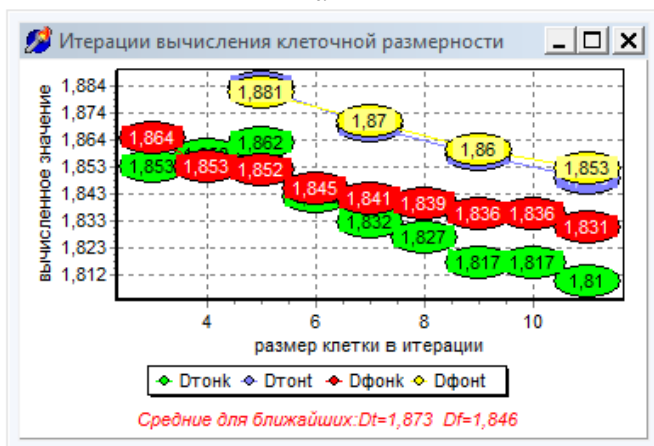
Рис. 2. Структура валкового чавуну до травлення (а, б) та після травлення (в, г)



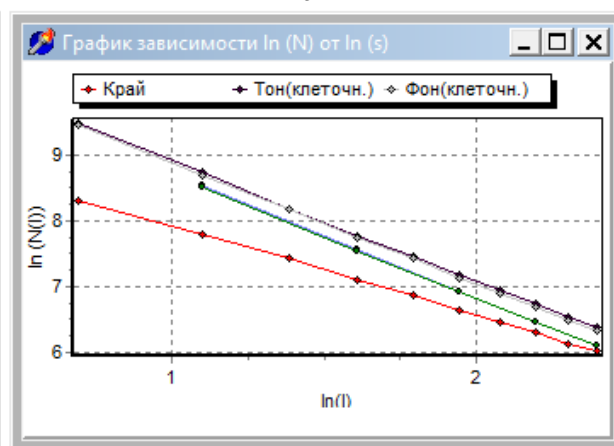
а



б



в



г

Рис. 3. Алгоритм розрахунку фрактальної розмірності структури валків

**Результати експерименту.** Фрактальну розмірність структури чавунних валків розраховували за запатентованою методикою [41], що поєднує в собі методи

визначення клітинної та точкової дробових розмірностей (рис. 3).

На рисунку 3, а зображено структуру чавуну, для якої обчислювалась фрактальна розмірність. Наведено приклад для

структури, зображеної на рис. 2, а. Для програмної обробки фотознімки мікроструктури переводилися в 256-колірний формат із відтінками сірого кольору. Програма реалізована в інформативному середовищі Delphi.

Після автоматичного проведення аналізу розподілу кольорів програма пропонувала діапазон кольорів для тону (темних ділянок структури) та фону (світлих ділянок структури). В даному випадку на рисунку 3, б наведено діапазон існування кольорів для тону. Це діапазон кольорів для перлітної матриці. Світлі ділянки структури ідентифікувались як карбіди. Розміри клітинок задавались у діапазоні 2...11 пікселів.

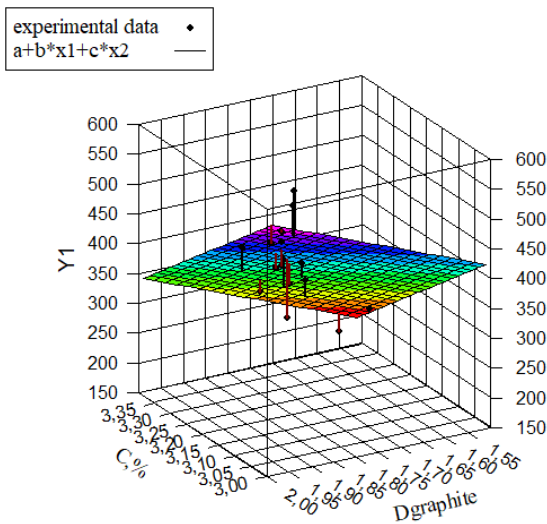
На наступному етапі реалізації алгоритму розраховувалися показники фрактальної розмірності за відомим клітинним методом Ф. Хаусдорфа та методом точкової розмірності. Залежність вирахованих значень фрактальних розмірностей  $D$  від розміру клітинки  $l$  в пікселях наведено на рисунку 3, в. У даному випадку найкраща збіжність результатів фрактальних розмірностей для темних елементів структури, обчислених за клітинним  $D_{тонк}$  та точковим методами  $D_{тонт}$ , спостерігається на п'ятому кроці

$$\text{ітерацій } Dt = \frac{(D_{тонк} + D_{тонт})}{2} = \frac{1,862 + 1,883}{2} =$$

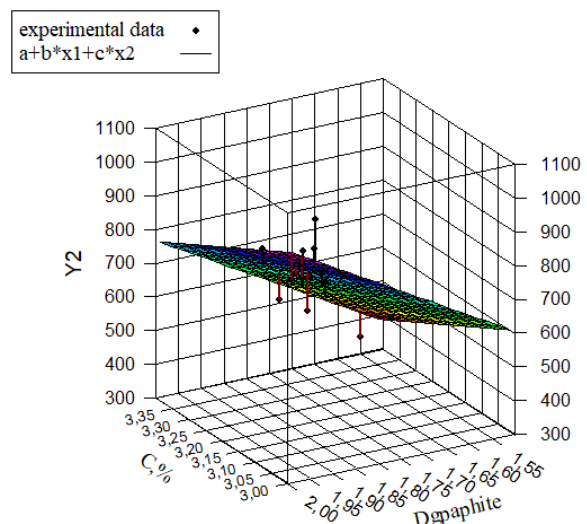
$$= 1,873. \text{ Для світлих ділянок структури найкраща збіжність значень для клітинної } D_{фонк} \text{ та точкової } D_{фонт} \text{ фрактальних розмірностей зафіксована на дев'ятому кроці розрахунків і становить } Df = \frac{(D_{фонк} + D_{фонт})}{2} = \frac{1,836 + 1,860}{2} = 1,848.$$

Такий підхід дозволяє мінімізувати випадкові значення фрактальних розмірностей під час їх розрахунку. Залежність кількості клітинок  $N$  від їх розміру  $l$  в білогарифмічних координатах наведена на рисунку 3, з. Тангенс кута нахилу цих залежностей і визначає фрактальну розмірність об'єкта дослідження.

На рисунку 4 а-г наведено графіки, що описують співвідношення фрактальної розмірності кулястого графіту  $D_{graphite}$  ( $X_2$ ), вмісту вуглецю  $C$  ( $X_1$ ) та механічних властивостей:  $Y_1$  – межа міцності на розрив;  $Y_2$  – межа міцності на згин;  $Y_3$  – ударна в'язкість;  $Y_4$  – твердість. На графіках рисунку 4 а-в показники механічних характеристик (міцності та ударної в'язкості) зростають при зменшенні вмісту вуглецю, що погоджується з даними праць [1; 2].



а



б

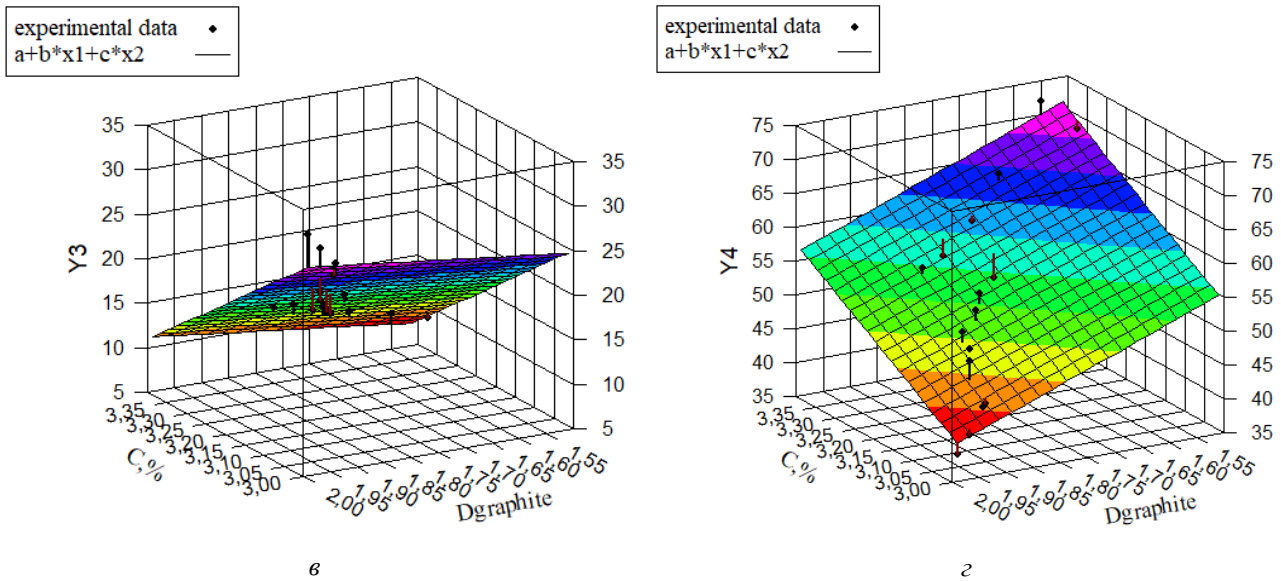


Рис. 4. Залежність механічних властивостей від фрактальної розмірності графіту та вмісту вуглецю

Фрактальна розмірність кулястого графіту збільшується (рис. 4, а–в), що свідчить про збільшення компактності заповнення ним простору. З рисунку 4, з випливає, що показники твердості зростають при збільшенні вмісту вуглецю, що також погоджується з теоретичними розрахунками його фізико-хімічного впливу. Розмірність включень графіту при цьому зменшується, що може свідчити про можливу необхідність добавки магнію, якого може бути недостатньо для надання йому правильної кулястої форми. В цьому

випадку зміну конфігурації форми кулястого графіту можна контролювати за значеннями його фрактальної розмірності, яку, в свою чергу, можна коригувати необхідною кількістю магнію.

Нижче наведено рівняння регресії (1–4) з коефіцієнтами парної кореляції  $R^2 = 0,82...0,91$ . Отримані результати свідчать про достатньо хороші результати прогнозу досліджуваних механічних властивостей (табл. 2).

$$Y1 = 1\,708,80 - 578,74 \cdot X1 + 299,95 \cdot X2 \quad R^2 = 0,91 \quad (1)$$

$$Y2 = 1\,096,44 - 549,62 \cdot X1 + 771,28 \cdot X2 \quad R^2 = 0,85 \quad (2)$$

$$Y3 = 143,40 - 43,28 \cdot X1 + 7,47 \cdot X2 \quad R^2 = 0,86 \quad (3)$$

$$Y4 = -17,09 + 39,72 \cdot X1 - 30,88 \cdot X2 \quad R^2 = 0,82 \quad (4)$$

Результати оцінювання впливу фрактальної розмірності карбідів (в основному це цементит ледебуритної евтектики) та вуглецю на механічні властивості наведені на рисунку 5, а–з. В даному випадку спостерігається підвищення механічних властивостей чавунних валків при зменшенні вмісту вуглецю ( $X1$ ) та фрактальної розмірності карбідів  $Dcarbide$  ( $X2$ ) (рис. 5, а–в) і навпаки, твердість валків

зменшується при зменшенні вмісту вуглецю та фрактальної розмірності карбідів (рис. 5, з).

Із цього факту випливає, що фрактальну розмірність можна застосовувати як індикатору чутливості механічних властивостей до структури чавунних валків із кулястою формою включень графіту.

Отримані на основі аналізу поверхонь (рис. 5) рівняння регресії (5–8) і коефіцієнти

їх парної кореляції  $R^2 = 0,84...0,94$  також підтверджують можливість їх застосування до контролю критеріїв якості та структури

досліджуваного валкового чавуну виконання СШХН.

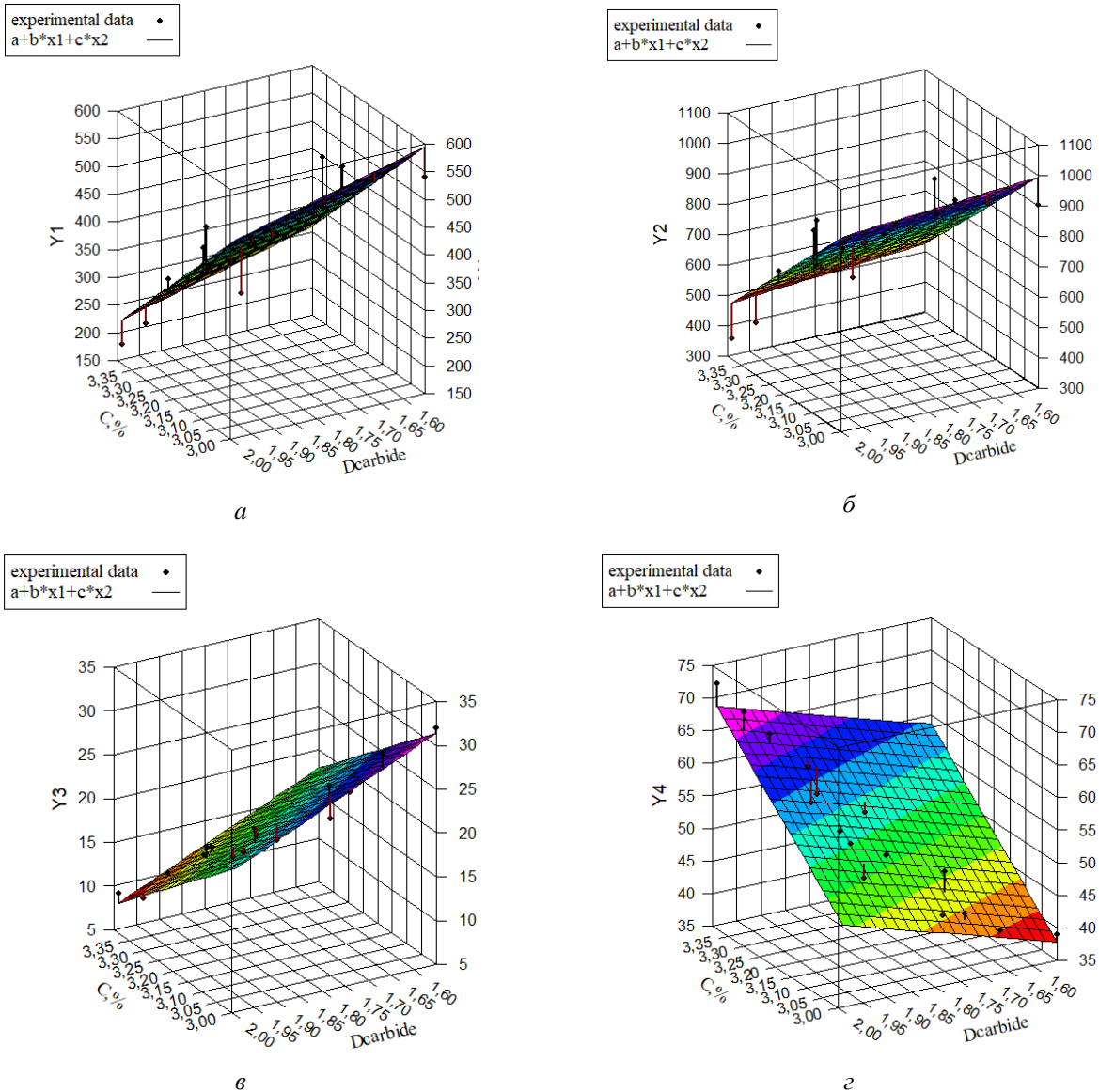


Рис. 5. Залежність механічних властивостей від фрактальної розмірності карбідів та вмісту вуглецю

$$Y1 = 3\,038,53 - 710,16 \cdot X1 - 202,08 \cdot X2$$

$$R^2 = 0,84 \quad (5)$$

$$Y2 = 4\,717,78 - 1\,177,04 \cdot X1 - 123,58 \cdot X2$$

$$R^2 = 0,78 \quad (6)$$

$$Y3 = 167,47 - 33,56 \cdot X1 - 22,82 \cdot X2$$

$$R^2 = 0,85 \quad (7)$$

$$Y4 = -153,25 + 52,19 \cdot X1 + 22,26 \cdot X2$$

$$R^2 = 0,94 \quad (8)$$

Моделі (1–8) мають лінійний характер, що вказує на існування взаємно однозначної відповідності між механічними властивостями, вмістом вуглецю та фрактальною розмірністю елементів структури валкового чавуну з перлітною матрицею, кулястим графітом, карбідами.

Відносно результатів розрахунків у таблиці 2, наведених за даними заводських експериментів та отриманими рівняннями регресії (1–8), слід зазначити, що максимальна середня похибка прогнозу механічних властивостей чавунних валків виконання СШХН становить 7,8 %, а

мінімальна 2,4 %, що надає можливість застосувати ці результати на практиці для випуску валків.

Крім практичної цінності отриманих результатів, слід відмітити і їх наукову цінність, яка полягає у встановленні нових

закономірностей між елементами структури, хімічним складом та механічними характеристиками масивних металевих відливок із чавуну, що особливо актуально у зв'язку з багатопараметричністю періодичної технології їх випуску.

Таблиця 2

Результати прогнозу механічних властивостей валків СШХН

$Y_{1екс}$	$Y_1$ (1)	$Y_{2екс}$	$Y_2$ (2)	$Y_{3екс}$	$Y_3$ (3)	$Y_{4екс}$	$Y_4$ (4)	$Y_{1екс}$	$Y_1$ (5)	$Y_{2екс}$	$Y_2$ (6)	$Y_{3екс}$	$Y_3$ (7)	$Y_{4екс}$	$Y_4$ (8)
223	217	420	414	9	9	68,5	70	223	256	420	521	9	10	68,5	66
380	414	750	752	17	19	54,5	53	380	400	750	742	17	18	54,5	55
304	277	588	549	12	11	65	64	304	279	588	549	12	12	65	64
415	374	786	734	16	16	56	55	415	336	786	637	16	15	56	59
540	569	903	982	32	28	39	41	540	595	903	995	32	31	39	38
600	522	1030	899	27	26	44	45	600	524	1030	922	27	25	44	45
360	315	720	619	14	13	60	61	360	312	720	592	14	14	60	61
500	499	880	877	22	24	49	46	500	502	880	879	22	25	49	46
440	467	803	832	21,5	22	49	49	440	445	803	814	21,5	20	49	51
333	432	665	779	18	20	53	52	333	417	665	767	18	19	53	53
177	206	350	423	9	8	72	70	177	222	350	470	9	8	72	68
550	555	935	954	30	28	41	42	550	565	935	970	30	29	41	41
430	455	800	821	19	22	51	50	430	443	800	798	19	21	51	51
580	531	953	912	26	27	44	44	580	539	953	939	26	27	44	43
380	359	700	665	17	16	54	58	380	376	700	683	17	18	54	56
320	339	600	671	15	14	56	58	320	321	600	605	15	15	56	60

**Висновки.** Проведено дослідження, пов'язані з впливом вуглецю на фрактальну розмірність структури валкового чавуну з кулястою формою графіту, що формується завдяки присадці магнію в межах експерименту від 0,038 до 0,054 %.

Застосування фрактального формалізму дозволило оцінити компактність кулястих включень графіту та можливість застосування фрактальної розмірності графіту і карбідів як індикатора зміни структури та механічних властивостей валків (межі міцності, ударної в'язкості та твердості).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скобло Т. С., Сидашенко А. И., Александрова Н. М., Ключко О. Ю. и др. Производство и применение прокатных валков : справочник. Харьков : ЦД № 1, 2013. 572 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. *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. *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. Саарбрюккен : 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. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L. Structure of High-Chromium Cast Iron. *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. № 3. Pp. 261–268.
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. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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>
15. Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Белкин Е. Л. Математическая оценка особенностей структурообразования высоколегированных чугунов. *Материаловедение*. 2014. № 8. С. 6–11.
16. 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-й Междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса : АстроПринт, 2001. С. 25–26.
17. 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>
18. Lyashenko T., Voznesensky V., Krovnyakov 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>
19. 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 Univer sity of Technology in Bratislava*. 2018. Pp. 48–53. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/1380>
20. 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>
21. 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>
22. 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>
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. 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>
25. 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>
26. Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York, San Francisco : Freeman, 1982. 480 p.
27. 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>
28. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials : monograph*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p.
29. 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>

30. 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>
31. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165
32. 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>
33. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Zotov D. S., Sokoliuk V. I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C–Mn–Al–Ti–N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. 2021. Vol. 2389, №. 1. Pp. 080002. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0063496>
34. Vakhrusheva V. S., Volchuk V. M., Hruzyn N. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*. 2021. Vol. 135, №. 5. Pp. 57–63. URL: <https://doi.org/10.46813/2021-135-057>
35. Volchuk V. M., 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>
36. Zhuravel' I. M., Michuda L. Z. Application of the Mandelbrot – Zipf Law for the Quantitative Evaluation of the Average Size of Steel Grains. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. Pp. 80–85. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00517-2>
37. 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>
38. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019. Vol. 968. Pp. 20–25. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>
39. 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>
40. Ivanov D. V., Antonov A. S., Semenova E. M., Romanovskaia E. V., Afanasiev M. S., Sdobnyakov N. Y. Determination of the fractal size of titanium films at different scales. *Journal of Physics : Conference Series*. IOP Publishing. 2021. Vol. 1758, №. 1. Pp. 012013. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1758/1/012013>
41. Большаков В. И., Дубров Ю. И., Криулін Ф. В., Волчук В. М. Патент на винахід № 51439А України. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення. Бюл. № 11. 15.11.2002.

## REFERENCES

1. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Aleksandrova H.M., Klochko O.Yu. and oth. *Proizvodstvo i primeneniye prokatnykh valkov : spravochnik* [Production and use of rolling rolls : directory]. Kharkiv : CD no. 1, 2013, 572 p. (in Russian).
2. 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).
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]. *Metalloznavstvo 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 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 Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
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. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L. Structure of high-chromium cast iron. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 3, pp. 261–268.
10. 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).
11. 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]. *Perspektivnyye zadachi inzhenernoy nauki* [Perspective Tasks of Engineering Science]. Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, vol. 2, pp. 203–208. (in Russian).
12. 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. Conf.]. Odessa : AstroPrint Publ., 2006, pp. 146–150. (in Russian).
13. 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 Prydniprovsk'oyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 11, pp. 4–7. (in Russian).
14. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu klasya 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).
15. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L. *Matematicheskaya otsenka osobennostey strukturoobrazovaniya vysokolegirovannykh chugunov* [Mathematical evaluation of the features of heavily alloyed irons structure]. *Materialovedenie* [Metal Science]. 2014, no. 8, pp. 6–11. (in Russian).
16. 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-y Mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : Proc. to the 40th Intern. family on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa : AstroPrint, 2001, pp. 25–26. (in Russian).
17. 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.
18. 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.
19. 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 "Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture"*; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, pp. 48–53.
20. Volchuk V.M. and Shtandenko M.S. *Matematychna model prohnozu yakosti metalu* [Mathematical model of the metal quality forecast]. *Visnyk Prydniprovsk'oyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 2, pp. 31–35. (in Ukrainian).
21. 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 Prydniprovsk'oyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 9, pp. 9–14. (in Russian).
22. 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).
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. 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.
25. 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).
26. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature* : monograph. New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p. URL: <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
27. 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.
28. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
29. 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.
30. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv C11XH-43 ta C11XHΦ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers C11XH-43 and C11XHΦ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
31. 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.
32. 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.
33. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Zotov D.S. and Sokoliuk V.I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C–Mn–Al–Ti–N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC. 2021, vol. 2389, no. 1, pp. 080002.
34. Vakhrusheva V.S., Volchuk V.M., Hruzin N.V. and Tiutieriev I.A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021, vol. 135, no. 5, pp. 57–63.
35. Volchuk V.M., 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.
36. Zhuravel' I.M. and Michuda L.Z. Application of the Mandelbrot – Zipf Law for the Quantitative Evaluation of the Average Size of Steel Grains. *Materials Science*. 2021, vol. 57, pp. 80–85.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Ivanov D.V., Antonov A.S., Semenova E.M., Romanovskaia E.V., Afanasiev M.S. and Sdobnyakov N.Yu. Determination of the fractal size of titanium films at different scales. *Journal of Physics : Conference Series*. IOP Publishing. 2021, vol. 1758, no. 1, pp. 012013.
41. Bol'shakov V.I., Dubrov Yu.I., Kryulin F.V. and Volchuk V.N. *Sposib vyznachennya fraktal'noyi rozmirnosti zobrazhennya* [Method for Determining the Dimensionality of Images]. Patent product no. 51439A, UA. MPK 7 G06K9/00, bulletin no. 11, 2002. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.11.2021.