

УДК 620.175:669.15

Володимир Волчук¹, д.т.н., проф.; Діана Глушкова², д.т.н., проф.; Дмитро Казарян¹, аспірант; Сергій Мариненко³, к.т.н., доц.; Віктор Сенчишин³, к.т.н., доц.; Ігор Коваль³, к.т.н., доц.

¹Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, 49600, м. Дніпро, вул. Архітектора О. Петрова, 24-а, Україна

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНІВ

Анотація. У роботі розглянуто застосування мультифрактального аналізу для кількісної оцінки мікроструктури та прогнозування механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків марки СПХН (з пластинчастим графітом). Мультифрактальний аналіз проводили шляхом розрахунку спектру статистичних розмірностей Реньї (D_q), зокрема фрактальної (D_0), інформаційної (D_1) та кореляційної (D_2) розмірностей. Встановлено високу чутливість механічних властивостей чавунів до мультифрактальних параметрів структури. Показано, що збільшення фрактальної розмірності пластинчастого графіту від 1,58 до 1,97 призводить до суттєвого зниження показників міцності та пластичності. Отримані регресійні залежності дозволяють проводити прогноз чавунних валків з мінімальними матеріально-часовими витратами.

Ключові слова: чавунні валки, мікроструктура, мультифрактальний аналіз, фрактальна розмірність, механічні властивості, прогнозування якості.

Volodymyr Volchuk, Diana Hlushkova, Dmytro Kazarian, Serhii Marynenko, Viktor Senchyshyn, Ihor Koval

APPLICATION OF MULTIFRACTAL ANALYSIS FOR MODELING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CAST IRONS

Abstract. This paper examines the application of multifractal analysis for the quantitative assessment of microstructure and the prediction of mechanical properties of grade SPKhN cast iron rolling rolls with flake graphite. The multifractal analysis was performed by calculating the spectrum of Rényi statistical dimensions (D_q), particularly the fractal (D_0), information (D_1), and correlation (D_2) dimensions. A high sensitivity of the mechanical properties of cast irons to the multifractal parameters of the structure was established. It is shown that increasing the fractal dimension of flake graphite from 1.58 to 1.97 results in a significant decrease in strength and ductility. The obtained regression dependencies enable the prediction of the quality of cast iron rolls with minimal material and time costs.

Keywords: cast iron rolls, microstructure, multifractal analysis, fractal dimension, mechanical properties, quality prediction

Вступ. Чавунні сортопрокатні валки є одним із найвідповідальніших елементів прокатного обладнання, від яких залежать продуктивність, якість продукції та економічна ефективність металургійного виробництва. Валковий чавун (марки СПХН з пластинчастим графітом) поєднує відносно високу твердість, зносостійкість і помірну міцність, що робить його широко застосовуваним матеріалом для виготовлення валків. Основні області використання - сортопрокатні стани, де валки працюють в умовах високих контактних напружень, циклічних навантажень і інтенсивного зношування.

Властивості чавунних валків суттєво залежать від параметрів мікроструктури - форми, розмірів, розподілу графітних включень та карбідної фази, а також типу металевої матриці. Вплив температури на властивості сталі є важливим фактором, оскільки термічна обробка змінює її структуру, що призводить до варіацій у властивостях [1-3]. Крім того, в реальних умовах експлуатації валки можуть зазнавати неконтрольованого температурного впливу (перегрів, термічні удари), що спричиняє структурні зміни, посилює неоднорідність і ускладнює ідентифікацію параметрів мікроструктури [4].

Метою роботи є встановлення кількісних закономірностей між мультифрактальними характеристиками елементів структури (графіту та карбідів) та механічними властивостями чавунів - межею міцності на розрив σ_B , межею міцності на згин σ_L , ударною в'язкістю КС, твердістю HSD.

Методики і матеріали. Хімічний склад чавунних валків наведено в табл. 1.

Таблица 1

Хімічний склад валкового чавуну, в % від маси

Чавун	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
СПХН-45	2,82...2,98	0,55...0,85	0,60...0,80	0,092...0,112	0,015...0,044	0,58...0,82	1,14...1,27
СПШН-50	2,95...3,21	1,59...2,04	0,51...0,72	0,044...0,067	0,015...0,022	0,41...0,65	1,07...1,24

Мікроструктуру досліджували на оптичному мікроскопі Neophot-2 у нетравленому та травленому станах. Травлення проводили в 4-% розчині азотної кислоти в спирті.

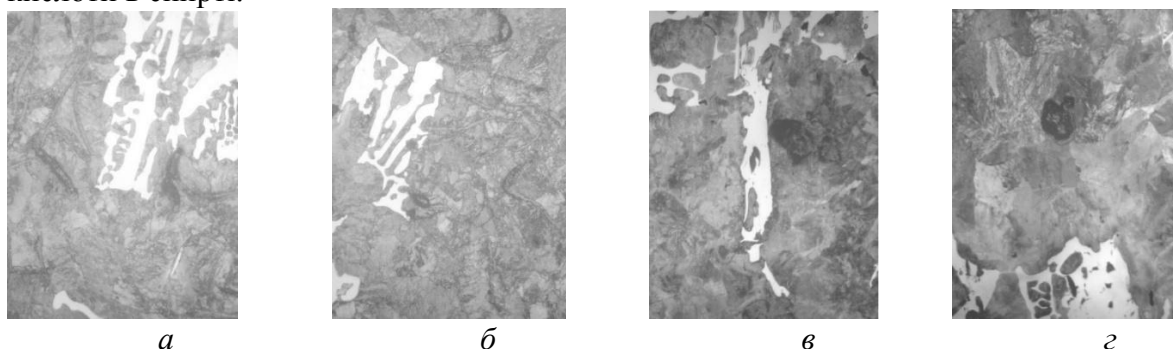


Рисунок 1. Будова бочок чавунних валків марки СПХН-45 (а, б) та СПШН-50 (в, г) з перлітною матрицею на глибині 20 мм від поверхні бочок: форма пластинчатого (а, б) та шаровидного графіту (в, г); ледебуритна евтектика, $\times 200$

Зображення переводили в цифровий формат і обробляли за спеціально розробленим алгоритмом. Розрахунок спектру статистичних розмірностей Реньї проводили за (1):

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow 0} \ln \sum_{i=1}^N \frac{p_i^q}{\ln \delta}, \quad (1)$$

де p_i — ймовірність потрапляння точки об'єкта в i -ту комірку сітки розміром δ .

Для повного охоплення спектру сингулярностей розрахунки проводили в широкому діапазоні параметра q – від -200 до $+200$.

Механічні властивості визначали за стандартними методиками: межа міцності на розрив - на універсальній машині Instron; межа міцності на згин- на машині ЦД-40;

ударна в'язкість (без надрізу) - на маятниковому копрі ПСВ-5; твердість – за методом Шора.

Для встановлення зв'язків між мультифрактальними характеристиками структури та механічними властивостями застосовували методи кореляційного та регресійного аналізу. Чутливість властивостей до зміни розмірностей оцінювали за спеціальною методикою:

$$K_i = |Y_i - Y_{i+1}| / |X_i - X_{i+1}|, \quad (2)$$

де X_1 і X_2 – два числа, що характеризують критерій якості в заданих областях $i=1, \dots, n$ та Y_1 і Y_2 – відповідні значення розмірностей, отриманих в цих областях.

Результати та їх обговорення. Результати розрахунку спектру статистичних розмірностей Реньї наведено на рис. 2.

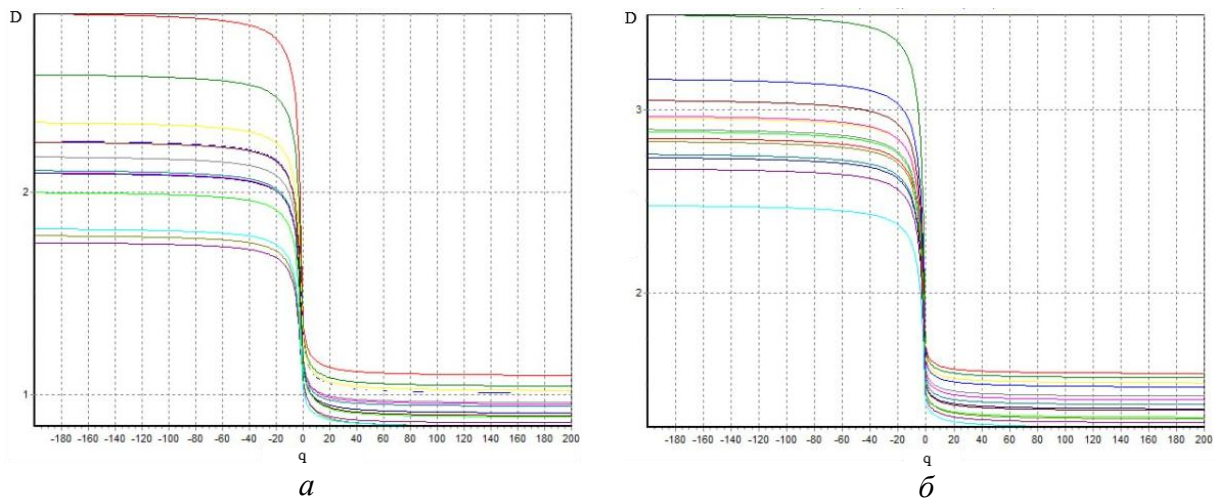


Рисунок 2. Спектр мультифрактальних розмірностей графіту (а) та карбідів (б)

Результати проведеного аналізу показали, що механічні властивості чавунів мають найбільшу чутливість саме до фрактальної, інформаційної та кореляційної розмірностей графітної та карбідної фаз (рис. 3). У подальшому кількісний взаємозв'язок розглядався виключно між цими найбільш інформативними мультифрактальними параметрами.

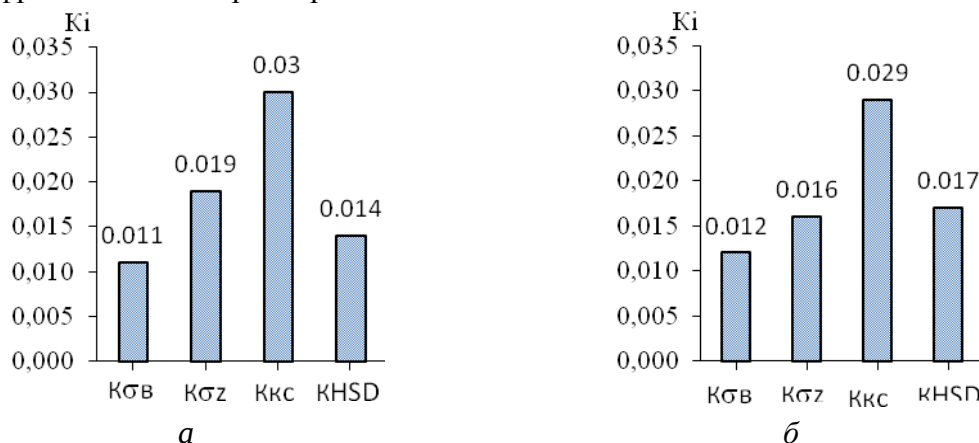


Рисунок 3. Чутливість механічних властивостей до фрактальної D_0 (а), інформаційної D_1 (б) розмірностей графіта робочої зони бочок чавунних валків СПХН

Аналіз отриманих залежностей підтверджує можливість кількісної оцінки впливу структури на властивості чавунів (рис. 4). Межі пластинчастих графітних включень

виступають активними концентраторами мікронапружень. Зростання їх об'єму призводить до послаблення металевої матриці, що знижує несучу здатність матеріалу.

Мультифрактальний аналіз показав, що фрактальна розмірність (D_0) структурної фази переважно відображає геометричну складність і форму елементів, тоді як інформаційна (D_1) та кореляційна (D_2) розмірності найбільше залежать від об'ємної частки та характеру розподілу цих елементів у матриці.

Спостерігається стійка тенденція до зниження міцнісних характеристик валків зі збільшенням фрактальної розмірності пластинчастого графіту (рис. 4 а, б). Цей ефект частково пов'язаний зі збільшенням вмісту графіту від 0,5 до 2,5 %, ростом довжини його пластин від ПГд45 до ПГд180, а також підвищенням концентрації нікелю при 0,99–1,17 %.

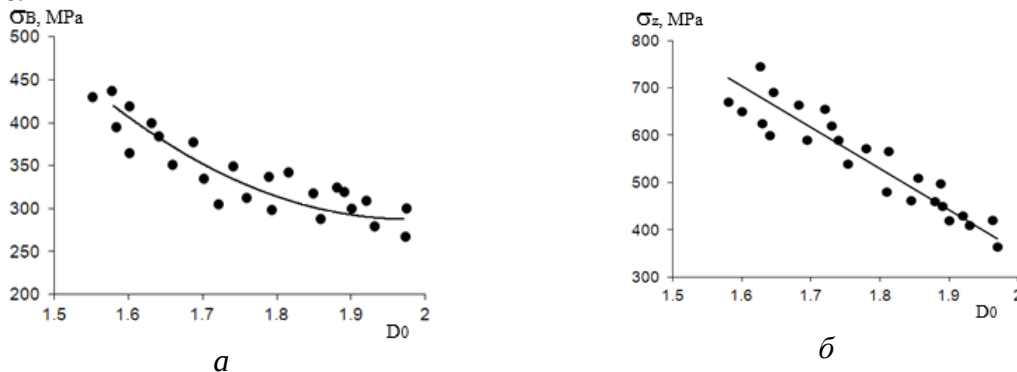


Рисунок 4. Залежність механічних властивостей від мультифрактальних характеристик

Отримані регресійні рівняння (3–6) демонструють задовільну адекватність і статистично значущі коефіцієнти кореляції.

$$\sigma_{\text{в}} = 825,16 \cdot D_0^2 - 3315,4 \cdot D_0 + 3499; \quad r^2 = 0,85 \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{згин}} = -866,35 \cdot D_0 + 2118,7; \quad r^2 = 0,88 \quad (4)$$

$$KC = -74,113 \cdot D_1^2 + 245,29 \cdot D_1 - 162,81; \quad r^2 = 0,89 \quad (5)$$

$$HSD = 249,86 \cdot D_1^2 - 764,95 \cdot D_1 + 678,29. \quad r^2 = 0,83 \quad (6)$$

Використання мультифрактальних параметрів поряд з традиційними характеристиками структури дозволило прогнозувати механічні властивості валків з мінімальними матеріально-часовими витратами.

Висновки

1. У роботі показано перспективність застосування мультифрактального аналізу як сучасного кількісного інструменту для оцінки складної мікроструктури сортопрокатних чавунних валків. Розрахунок спектру статистичних розмірностей Реньї дозволяє об'єктивно характеризувати геометричну складність, неоднорідність розподілу та самоподібність графітної та карбідної фаз.

2. Встановлено високу чутливість механічних властивостей чавунів до фрактальної (D_0), інформаційної (D_1) та кореляційної (D_2) розмірностей структурних елементів. Найбільший вплив на міцність і пластичність здійснює фрактальна розмірність графіту, тоді як інформаційна та кореляційна розмірності суттєво впливають на ударну в'язкість і твердість матеріалу.

3. Для чавунів з пластинчастим графітом (СПХН) зростання фрактальної розмірності графіту від 1,58 до 1,97 призводить до зниження межі міцності на розрив на ~160 МПа та межі міцності на згин на ~400 МПа.

4. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження мультифрактального аналізу в практику матеріалознавчого контролю на підприємствах

з виробництва чавунних прокатних валків для підвищення стабільності їх механічних властивостей і зносостійкості.

Отримані наукові положення розширюють можливості кількісної оцінки структури чавунів і можуть бути використані для вдосконалення процесів їх виробництва.

Перелік посилань

1. V. Maslova, R. Nastase, G. Veryasov, N. Nesterenko, E. Fourré, C. Batiot-Dupeyrat, *Progress in Energy and Combustion Science*, 101, 101096 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101096>
2. B. O. Trembach, M. G. Sukov, V. A. Vynar et. al., *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44(4), 493 (2022). <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0493>
3. V.M. Volchuk, D.B. Hlushkova, *Functional Materials*, 31(2), 205 (2024) <https://doi.org/10.15407/fm31.02.205>
4. D.B. Hlushkova, A.V. Kalinin, N.E. Kalinina, V.M. Volchuk, V.A. Saenko, A.A. Efimenko, *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(144), 126-129 (2023). <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>