

**Е. В. Парусов**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4560-2043

**А. Ю. Борисенко**, д.т.н., с.н.с., ORCID ID: 0000-0003-2120-0944

**Е. В. Олійник**, ORCID 0000-0002-3366-3746

**І. М. Чуйко**, к.т.н., ст. досл., ORCID 0000-0002-4753-614X

**О. В. Парусов**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9879-6179

<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ГРАФІТОВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТРУКТУРІ ЧАВУНУ

**Анотація.** Застосування теорії фракталів під час аналізу або моделювання різних процесів формування структур та визначення їхнього зв'язку із властивостями матеріалу є найбільш поширеним, доступним і достовірним напрямом у матеріалознавстві. Мета роботи полягала у визначенні фрактальної розмірності графітових включень в залежності від їхньої форми та розподілу в структурі сірого чавуну. Пошук середньої фрактальної розмірності графітових включень проведено за допомогою комп'ютерної програми, алгоритм роботи якої полягає у визначенні найближчої збіжності значень фрактальних розмірностей, що обчислюються за допомогою клітинного та точкового методів. Наведено приклад застосування зазначеної комп'ютерної програми та алгоритму визначення фрактальних розмірностей графітових включень і металевої матриці, а також інших структурних складових сірого чавуну. Отримані розрахункові показники мають конкретні числові значення, тому у подальшому вони можуть бути використані для створення аналітичних моделей прогнозного визначення властивостей сірих чавунів в залежності від параметрів кінцевої структури. Показано, що за допомогою методу фрактального аналізу може бути вирішена задача стосовно достовірного й найбільш точного кількісного визначення графітних включень в структурі сірого чавуну. Розглянутий метод визначення фрактальної розмірності може бути корисним під час дослідження особливостей процесів структуроутворення та оцінки морфології графітових включень на різних стадіях оброблення сірих чавунів, починаючи з етапу виплавляння та завершуючи фінішною термічною обробкою. Додатково фрактальний аналіз може бути задіяно для визначення та оцінки впливу морфологічних параметрів графітових включень на формування показників якості сірих чавунів, що викликає певні труднощі при використанні традиційних методів кількісного аналізу. Подальші дослідження будуть сфокусовані на встановленні статистично значущих кореляційних зв'язків

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

фрактальної розмірності з властивостями сірих чавунів, зокрема зміни твердості з урахуванням утворення структур змішаного або перехідного типу.

**Ключові слова:** фрактальний аналіз, фрактальна розмірність, структура, сірий чавун, графітові вклучення, металева матриця

**Посилання для цитування:** Застосування фрактального аналізу для кількісної оцінки графітових вклучень в структурі чавуну / Е. В. Парусов, А. Ю. Борисенко, Е. В. Олійник, І. М. Чуйко, О. В. Парусов // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 644-655. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-644-655>.

**Вступ.** Теорія фракталів та інформаційні показники фрактальних моделей свідчать про високу ефективність використання цієї системи наукових знань у різних галузях. У багатьох напрямках науки, які є різними за типами об'єктів дослідження та даних, накопичено достатню кількість інформації, що свідчить про істотну поширеність статичних закономірностей. При цьому переважну кількість кореляційних зв'язків можна описати, спираючись на фрактальні (мультифрактальні) моделі. Застосування теорії фракталів до аналізу або моделювання процесів структуроутворення та визначення їхнього зв'язку із властивостями матеріалу є найбільш поширеним, доступним та достовірним напрямом у матеріалознавстві [1-8].

Наразі активно вдосконалюються існуючі та створюються нові вироби зі сталей та сплавів, отримання яких у більшості випадків пов'язано з нерівноважними умовами. За даними чисельних досліджень кількісну оцінку елементів структури металевих матеріалів можна достовірно описати за допомогою теорії фракталів. Термін «фрактал» започатковано Б. Мандельбротом [9], а у сучасному розумінні фракталами є фігури, які мають властивості самоподібності або масштабної інваріантності.

Під час фрактального аналізу використовують математичний алгоритм виявлення єдиного чисельного параметра для описання структури металів та сплавів за різних видів обробок. Теорію фракталів успішно використовують на практиці для додаткового розуміння процесів структуроутворення в металевих матеріалах під час традиційного зварювання, селективного лазерного плавлення, аналізу поверхонь руйнування, прогностичного визначення властивостей, а також загального або залишкового ресурсу їх експлуатації [1, 3-13]. Застосування зазначеного підходу дозволяє встановити статистично значущі кореляційні зв'язки між фрактальною розмірністю різних структурних складових та фізико-механічними властивостями металевих матеріалів, зокрема границями плинності та міцності,

твердістю, показниками пластичності, ударною в'язкістю тощо.

Авторами робіт [14, 15] встановлено, що впливаючи на фазово-концентраційну неоднорідність, оброблення розплаву та умови його кристалізації можна цілеспрямовано керувати структурою графіту та металевої матриці з метою гарантованого отримання заданих властивостей сірих чавунів. Водночас металографічний аналіз структури виливків із сірого чавуну показав, що процеси кристалізації починаються з формування комірчастої будови, яка має зв'язок з концентраційно-структурною неоднорідністю розплаву. Величина комірок спадково впливає на форму та тип розподілу графіту. Зменшення величини комірок призводить до зменшення розміру графітових включень та зміни типу їхнього розподілу від пластинчастої завихреної до гніздоподібної (класифікація за ГОСТ 3443-87) з одночасним формуванням міждендритного графіту в центральній частині виливків. При цьому міждендритний графіт обумовлює утворення фериту у металевій матриці, а графіт пластинчастої завихреної морфології сприяє формуванню перлітної або перлітно-феритної структури у сірих чавунах.

Оскільки формування структури металевої матриці у сірих чавунах істотно залежить від морфології, розміру, кількості та розподілу графітових включень, то існує потреба у створенні достовірного аналізу та доступного методу, який дозволить отримати статистично значущий кореляційний зв'язок параметрів структури із твердістю в залежності від фрактальної розмірності графітових включень.

**Мета роботи** – визначення фрактальної розмірності графітових включень в залежності від їхньої форми та розподілу в структурі сірого чавуну.

**Методика дослідження.** У якості вихідних даних обрано типові структури чавуну з пластинчастим графітом (ГОСТ 3443-87, додаток № 3, шкала 1). Для визначення фрактальної розмірності графітових включень використано комп'ютерну програму, яка створена авторами роботи [16] у програмному середовищі Microsoft Visual Basic. До базових засад роботи комп'ютерної програми закладено алгоритм визначення фрактальної розмірності за допомогою збіжності двох методів – клітинного та точкового.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Відомо, що для кількісного опису фракталів достатньою умовою є визначення фрактальної розмірності або параметра, який описує збереженість статистичних характеристик при зміні масштабу. Аналіз традиційних методів дослідження структури металів і сплавів (світлова та електронна мікроскопія, кількісна металографія, рентгеноструктурний

аналіз) свідчить про те, що жоден з них не може бути універсальним і придатним для вирішення повного обсягу завдань щодо ідентифікації кількісних характеристик структури металевих матеріалів [9].

Під час класифікації графітових включень відповідно до вимог ГОСТ 3443-87 виходять з порівняльної оцінки фактичних структур чавуну з еталонними шкалами. Зазначений спосіб ідентифікації графітових включень вимагає від металографа певного досвіду та в деяких випадках ускладнює їхню класифікацію, особливо у разі утворення структур змішаного або перехідного типу.

У сучасних умовах, коли все більшого поширення набувають різноманітні комп'ютеризовані середовища, що призначені для проведення металографічних досліджень в автоматичному режимі, ідентифікацію графітових включень у структурі чавуну можна успішно вирішити за допомогою спеціальних комп'ютерних програм. Отже, авторами цієї роботи зроблена спроба визначення фрактальної розмірності графітових включень в залежності від їхньої форми та розподілу.

Фрактальний аналіз графітових включень у структурі сірого чавуну проводили у відповідності до вимог ГОСТ 3443-87 за методикою, сутність якої полягає у визначенні найближчої збіжності значень фрактальної розмірності ( $D$ ), яку обчислювали за допомогою клітинного та точкового методів [17]. Фрактальна розмірність, обчислена за допомогою клітинного методу Ф. Хаусдорфа, визначали за формулою:

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta}, \quad (1)$$

де  $N(\delta)$  – кількість клітин, якими покривають об'єкт дослідження із розміром клітини  $\delta$ .

За цим методом відповідне зображення накривають серією кліток та визначають фрактальну розмірність, виходячи з поетапної зміни розмірів клітин.

Точковий метод є альтернативним підходом до клітинного методу обчислення фрактальної розмірності. За цим методом фрактал покривається квадратною сіткою, а її вузли є осередками [16, 17]. Кожен із осередків, який має з фракталом непустий перетин вважається однією точкою. Точковий метод принципово відрізняється від клітинного – у першому випадку підраховують кількість точок у клітці, а у другому – визначають кількість кліток, необхідних для покриття фракталу. Для спрощення обчислень приймали, що клітинки мають квадратну форму, а їхній розмір ( $L$ ) приймали, як число осередків з кожної сторони фракталу. Якщо обмежитися непарними значеннями  $L$ ,

то у цьому випадку центральний осередок клітки буде рівновіддалений від усіх сторін. Спочатку обчислювали ймовірність  $P(m, L)$  того, що клітка розміром  $L$  містить  $m$  точок (осередків) фракталу. Для цього навколо кожної точки фракталу, вважаючи її центральною, будували клітку розміром  $L$  і підраховували кількість точок, яка потрапляє до неї. Припустимо, що фрактал містить  $M$  точок, тоді ймовірність  $P(m, L)$  дорівнює кількості кліток, що містять  $m$  точок ( $m = 1, \dots, M$ ) поділеному на  $M$ . Відзначимо, що сума всіх ймовірностей дорівнює одиниці:

$$\sum_{m=1}^M P(m, L) = 1 \quad (2)$$

Очевидно, що кількість кліток  $N$  розміром  $L$ , що містять  $m$  точок, дорівнює  $(M/m) \cdot P(m, L)$ . Отже, кількість кліток, що покривають все зображення дорівнює:

$$N(L) = \sum_{m=1}^K (M/m) \cdot P(m, L) = M \sum_{m=1}^K (1/m) P(m, L), \quad (3)$$

де  $K$  – можливе значення кількості точок у одній клітці.

Таким чином, усереднене значення кількості кліток ( $\tilde{N}$ ) розміром  $L$ , яке визначається за формулою (4) та є пропорційним  $L^{-D}$ , може бути використано для визначення фрактальної розмірності із використанням точкового методу:

$$\tilde{N}(L) = \sum_{m=1}^K (1/m) \cdot P(m, L) \sim L^{-D}, \quad (4)$$

Після завантаження фотознімку зображення, що аналізується, до робочого вікна та виконання заданої кількості сканувань з різним кроком відбувається обробка чисельних значень, які зберігаються в пам'яті комп'ютерної програми (рис. 1). Перед проведенням сканування зображення визначається область кольору, яку займають графітові включення, тобто фрактальну розмірність досліджуваного елемента, який необхідно визначити. Колірна гама «0» відповідає чорному кольору, а колірна гама «255» – білому кольору. Інші кольори становлять перехід від чорного до білого з відтінками сірого кольору. Область кольору темних (графітові включення) та світлих (непротравлена матриця) елементів структури (рис. 1, а) визначаються програмою автоматично завдяки статистичному обліку відтінків сірого кольору (рис. 1, б). Додатково передбачена можливість встановлення меж діапазону кольору в ручному режимі. На рис. 1, б наведено межі діапазону кольору темних включень, які знаходяться в інтервалі від 0 до 127. При встановленні граничних розмірів кліток відбувається автоматичний розрахунок фрактальної розмірності.

На рис. 2, а наведено дві функції, які показують зміну значень фрактальної розмірності залежно від кроку та номера ітерації (розміру клітки). Для графітових включень програма автоматично обирає за тон

темні об'єкти зображення і далі відбувається обчислення фрактальної розмірності за допомогою двох методів: клітинного ( $D_{t.k.}$ ) і точкового ( $D_{t.t.}$ ). Аналогічно розраховували світлі (фонові) об'єкти зображення – дві функції для значень  $D_{f.k.}$  і  $D_{f.t.}$ . Застосування такого підходу дозволяє визначити найбільш точне значення фрактальної розмірності, яке відповідає фактичній структурі залежно від розміру її елементів. Функції значень фрактальних розмірностей графіту на рис. 2 свідчать про їхню найбільшу збіжність на п'ятому кроці ітерації: для клітинного методу значення  $D_{t.k.}$  становить 1,245, для точкового –  $D_{t.t.}$  дорівнює 1,115, при середньому значенні 1,180 ( $D_t$ ).

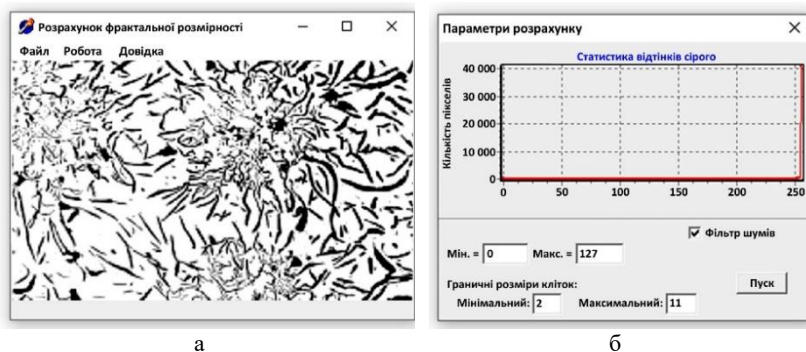


Рисунок 1 – Програмна реалізація визначення фрактальної розмірності графіту: а – завантаження фотознімку до робочого вікна комп'ютерної програми; б – вихідні дані для проведення відповідних розрахунків

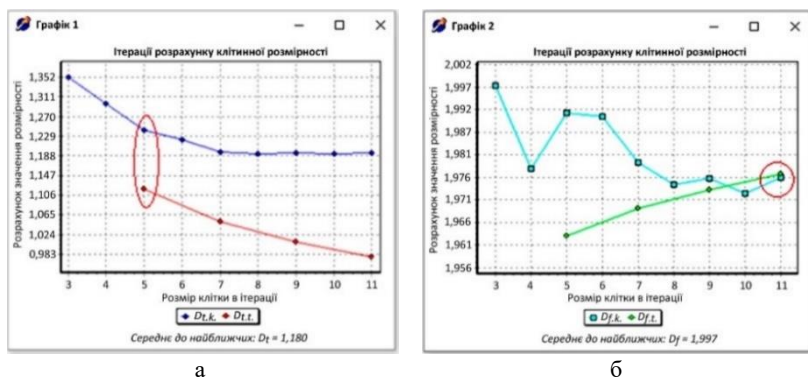


Рисунок 2 – Визначення найбільшої збіжності значень фрактальної розмірності: а – графітові включення, розрахунок за клітинним ( $D_{t.k.}$ ) і точковим ( $D_{t.t.}$ ) методами; б – непротравлена металева матриця, розрахунок за клітинним ( $D_{f.k.}$ ) і точковим ( $D_{f.t.}$ ) методами

За результатами розрахунку середнє значення фрактальної розмірності для чавуну з розетковим типом розподілу графіту (рис. 1, а) склало 1,180. Функції значень фрактальних розмірностей непротравленої металевої матриці (рис. 2, б) мають найбільшу збіжність на одинадцятому кроці ітерації, для клітинного методу  $D_{f.k}$  становить 1,976, для точкового  $D_{f.t}$  дорівнює 1,978, при середньому значенні 1,977 ( $D_f$ ).

Деякі з результатів розрахунку визначення фрактальної розмірності графітових включень, металевої матриці, а також довжини міжфазної границі графіт/металева матриця у структурі сірого чавуну (рис. 3) наведено у таблиці.

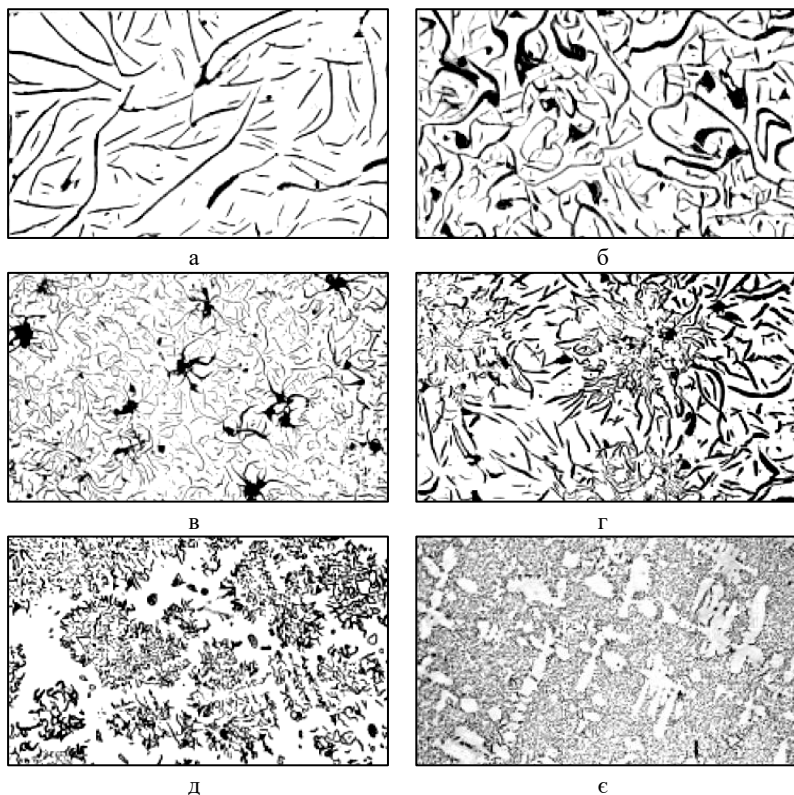


Рисунок 3 – Типові структури ( $\times 100$ ) за формою та розподілом графітових включень у структурі сірого чавуну (додаток № 3, шкала № 1 за ГОСТ 3443-87): а – пластинчаста прямолінійна форма; б – пластинчаста завихрена форма; в – гніздоподібний розподіл; г – розетковий розподіл; д – розподіл у міждендритних колоніях; е – міждендритний точковий розподіл

Отже, отримані значення фрактальної розмірності дозволяють розмежовувати класифікацію графітових включень за формою і розподілом у структурі чавуну, що відкриває додаткові можливості для створення універсального методу кількісної оцінки елементів структури із використанням фрактального аналізу.

У якості додаткового параметру, що враховує розподіл графітових включень у металевій матриці, може бути застосована лакунарність, яка характеризує міру того, як фрактал заповнює простір.

Розрахункові параметри, які наведено у таблиці 1, мають не описовий характер, а конкретні числові значення, тобто у подальшому вони можуть бути використані для створення аналітичних моделей щодо прогнозного визначення якості сірих чавунів в залежності від особливостей формування типу кінцевої структури. Додатково фрактальний аналіз може бути застосовано для визначення та оцінки впливу морфологічних параметрів графітових включень на формування показників якості сірих чавунів, що викликає певні труднощі при використанні традиційних методів кількісного аналізу.

Таблиця 1 – Кількісна оцінка елементів структури сірого чавуну за допомогою фрактального аналізу

Параметр	Типова структура					
	рис. 1, а	рис. 1, б	рис. 1, в	рис. 1, г	рис. 1, д	рис. 1, є
Фрактальна розмірність графіту ( $D_f$ )	1,180	1,328	1,344	1,539	1,590	1,799
Площа, яку займає графіт, %	7,71	16,41	21,88	20,82	19,07	62,83
Фрактальна розмірність матриці ( $D_m$ )	1,977	1,942	1,940	1,939	1,947	1,890
Площа, яку займає металева матриця, %	92,29	83,59	78,12	79,18	80,93	37,17
Довжина міжфазних границь графіт/металева матриця, пкс.	5820	8584	14112	13313	12698	21071

## Висновки

Результати досліджень свідчать про те, що фрактальна розмірність виявляється чутливою до зміни форми та розподілу графітових включень у сірих чавунах і може бути використана в якості критерія



оцінки структурних змін, які істотно впливають на формування його властивостей. Беручи до уваги викладене, існують передумови для подальших досліджень, що будуть сфокусовані на встановленні статистично значущих кореляційних зв'язків фрактальної розмірності з властивостями сірих чавунів, зокрема зміни твердості з урахуванням утворення структур змішаного або перехідного типу.

#### Перелік посилань

1. Xue X., Lin K., Yu W., Wu Z., Shen M., Xue T. Fractal theory-based contact analysis of surface microtextured involute spline coupling. *Tribology International*. 2024. Vol. 200. 110055. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110055>
2. Kotowski P. Fractal dimension of metallic fracture surface. *International Journal of Fracture*. 2006. Vol. 141. P. 269–286. <https://doi.org/10.1007/s10704-006-8264-x>
3. Lung C. W., Zhang S. Z. Fractal dimension of the fractured surface of materials. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1989. Vol. 38(1–3). P. 242–245. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(89\)90200-5](https://doi.org/10.1016/0167-2789(89)90200-5)
4. Trefilov V. I., Kartuzov V. V., Minakov N. V. Fractal dimension of fracture surfaces. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001. Vol. 43. P. 95–98. <https://doi.org/10.1023/A:1010537031635>
5. Kabaldin Yu. G., Anosov M. S., Chernigin M. A. Estimation of structural damage in structural alloys obtained on the basis of 3D printing by electric arc welding based on fractal analysis of microstructures. *Chernye Metally*. 2023. Vol. 3. P. 65–73. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.11>
6. Штофель О. О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу. *Металознавство та обробка металів*. 2019. Т. 91. № 3. С. 40–46.
7. Shtofel O., Holovko V., Chyzhska T. Фрактальний та металографічний аналізи як інноватика у забезпеченні якості металевої продукції. *Innovative Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific Research and Technological Processes* : Publishing House of University of Technology, Katowice, Poland, 2021. P. 1013–1018.
8. Штофель О. О., Рабкина М. Д. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення зміни властивостей металу. *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*. 2019. Вип. № 58(2). С. 28–33. [https://doi.org/10.20535/1970.58\(2\).2019.189335](https://doi.org/10.20535/1970.58(2).2019.189335)
9. Штофель О. О. Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку структури і властивостей конструкційних сталей : дис. канд. техн. наук : 05.16.01. Київ, 2021. 163 с.
10. Штофель О. О., Головки В. В., Чижська Т. Г. Застосування фрактального та металографічного аналізів для оцінки якості металу зварних швів. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 5. С. 70–74. <https://doi.org/10.37434/as2021.05.11>
11. Shtofel O. O., Chizhska T. G., Kulieznova S. S. Metallographic studies of vessel steel samples: ДС, 35Г/40Г and steel 20 by fractal analysis. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*. 2020. Vol. 6. Iss. 2. P. 3047–3050.

12. Усов В. В., Рабкіна М. Д., Шкатуляк Н. М., Рибак Н. І., Штофель О. О. Застосування фрактального аналізу при діагностиці технічного стану елементів металоконструкцій. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2022. № 1. С. 22–30. <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.02>

13. Тороп В. М., Рабкіна М. Д., Штофель О. О., Усов В. В., Шкатуляк Н. М., Савчук О. С. Про причини руйнування арматурних канатів захисних оболонок енергоблоків АЕС. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. Т. 54. № 2. С. 98–106. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM\\_2018\\_54\\_2\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2018_54_2_14)

14. Борисенко А. Ю., Левченко Г. В. Вплив ліквідації на утворення графіту у чавунах. *Наука і металургія* : всеукраїнська науково-технічна конференція, 14-16 листопада 2023 р., м. Дніпро, ІЧМ НАНУ, 2023. С. 55. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-conferens>.

15. Борисенко А. Ю., Левченко Г. В. Спадковість сірих чавунів. *Наука і металургія* : всеукраїнська науково-технічна конференція, 14-16 листопада 2023 р., м. Дніпро, ІЧМ НАНУ, 2023. С. 70. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-conferens>.

16. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення : деклараційний патент 51439 Україна. № 2002042586 ; заявл. 02.04.2002 ; опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11, 6 с.

17. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Фракталы в материаловедении. Днепропетровск : ПГАСА, 2006. 253 с.

## References

1. Xue, X., Lin, K., Yu, W., Wu, Z., Shen, M., & Xue, T. (2024). Fractal theory-based contact analysis of surface microtextured involute spline coupling. *Tribology International*, 200, 110055. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110055>

2. Kotowski, P. (2006). Fractal dimension of metallic fracture surface. *International Journal of Fracture*, 141, 269-286. <https://doi.org/10.1007/s10704-006-8264-x>

3. Lung, C. W., & Zhang, S. Z. (1989). Fractal dimension of the fractured surface of materials. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 38(1-3), 242-245. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(89\)90200-5](https://doi.org/10.1016/0167-2789(89)90200-5)

4. Trefilov, V. I., Kartuzov, V. V., & Minakov, N. V. (2001). Fractal dimension of fracture surfaces. *Metal Science and Heat Treatment*, 43, 95-98. <https://doi.org/10.1023/A:1010537031635>

5. Kabaldin, Yu. G., Anosov, M. S., & Chernigin, M. A. (2023). Estimation of structural damage in structural alloys obtained on the basis of 3D printing by electric arc welding based on fractal analysis of microstructures. *Chernye Metally*, (3), 65-73. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.11>

6. Shtofel, O. O. (2019). Zastosuvannya metodu fraktalnoho analizu do vyvchennia struktury metalu [Application of the method of fractal analysis to the study of the metal structure]. *Metal science and metal processing*, 91(3), 40-46. [In Ukrainian].

7. Shtofel, O., Holovko, V., & Chyzhska, T. (2021). Fraktalni ta metalohrafichni analizi iak innovatyka u zabezpechenni iakosti metalevoi produktsii [Fractal and metallographic analyzes as an innovation in ensuring the quality of metal products]. *Innovative Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific*

*Research and Technological Processes*, Publishing House of University of Technology, Katowice, Poland, 1013-1018. [In Ukrainian].

8. Shtofel, O. O., & Rabkina, M. D. (2019). Zastosuvannia metodu fraktalnoho analizu do vyvchennia zminy vlastyvostei metalu [Application of the method of fractal analysis to the study of changes in metal properties]. *KPI Bulletin. Instrumentation series*, 58(2), 28-33. [In Ukrainian].  
[https://doi.org/10.20535/1970.58\(2\).2019.189335](https://doi.org/10.20535/1970.58(2).2019.189335)

9. Shtofel, O. O. (2021). Vdoskonalennia metodu fraktalnoho analizu dlia otsinky vzaemozv'iazku struktury i vlastyvostei konstruktsiinykh stali [Improvement of the method of fractal analysis to assess the relationship between the structure and properties of structural steels], Ph. D. thesis: 05.16.01, Kyiv. [In Ukrainian].

10. Shtofel, O. O., Holovko, V. V., & Chyzhska, T. G. Zastosuvannia fraktalnoho ta metalografichnoho analiziv dlia otsinky yakosti metalu zvarnykh shviv [Application of fractal and metallographic analyzes to assess the quality of the metal of welds]. *Automatic Welding*, (5), 70-74. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/as2021.05.11>

11. Shtofel, O. O., Chizhskaya, T. G., & Kulieznova, S. S. (2020). Metallographic studies of vessel steel samples: DS, 35G/40G and steel 20 by fractal analysis. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, 6(2), 3047-3050.

12. Usov, V. V., Rabkina, M. D., Shkatuliak, N. M., Rybak, N. I., & Shtofel, O. O. (2022). Zastosuvannia fraktalnoho analizu pry diahnostytsi tekhnichnoho stanu elementiv metalokonstruktsii [The use of fractal analysis in the diagnosis of the technical condition of elements of metal structures]. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, (1), 22-30. [In Ukrainian].  
<https://doi.org/10.37434/tdnk2022.01.02> (in Ukrainian).

13. Torop, V. M., Rabkina, M. D., Shtofel, O. O., Usov, V. V., Shkatuliak, N. M., & Savchuk, O. S. (2018). Pro prychny ruinyvannia armaturnykh kanativ zahysnykh obolonok enerhoblokv AES [About the reasons for the destruction of reinforcing cables of protective shells of NPP power units]. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 54(2), 98-106. [In Ukrainian]. URL:  
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM\\_2018\\_54\\_2\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2018_54_2_14)

14. Borisenko, A. Yu., & Levchenko, G. V. (2023, November 14-16). Vplyv likvatsii na utvorennia hrafitu u chavunakh [The influence of liquation on the formation of graphite in cast irons]. *Science and Metallurgy*, All-Ukrainian Scientific and Technical Conference, Dnipro, Ukraine, 55. [In Ukrainian].  
<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-conferens>

15. Borisenko, A. Yu., & Levchenko, G. V. (2023, November 14-16). Spadkovist sirykh chavuniv [Heredity of gray cast irons]. *Science and Metallurgy*, All-Ukrainian Scientific and Technical Conference, Dnipro, Ukraine, 70. [In Ukrainian].  
<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-conferens>

16. Bolshakov, V. I., Dubrov, Yu. I., Kryulin, F. V., & Volchuk, V. M. (2002). Patent of Ukraine No. 51439A, Ukraine: Ukrpatent.

17. Bolshakov, V. I., Volchuk, V. N., & Dubrov, Yu. I. (2005). *Fraktaly v materialovedenii* [Fractals in Materials Science]. PSACEA. [In Russian].

**E. V. Parusov**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4560-2043  
**A. Yu. Borisenko**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-2120-0944  
**E. V. Oliinyk**<sup>1</sup>, ORCID 0000-0002-3366-3746  
**I. M. Chuiko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4753-614X  
**O. V. Parusov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9879-6179

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

## APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS FOR QUANTITATIVE EVALUATION OF GRAPHITE INCLUSIONS IN THE CAST IRON STRUCTURE

**Abstract.** The application of the theory of fractals in materials science during the analysis or modeling of various types of structures and their relationship with material properties is the most widespread, accessible and reliable direction. The purpose of the work was to determine the fractal dimension of graphite inclusions depending on their shape and distribution in the structure of gray cast iron. The search for the average fractal dimension of graphite inclusions was carried out in a computer program, the essence of which is to determine the closest convergence of fractal dimension values calculated using cell and point methods. An example of the application of the specified computer program and algorithm for determining the fractal dimensions of graphite inclusions and the metal matrix, as well as other structural elements of gray cast iron, is provided. The obtained calculated values have specific numerical values, therefore, in the future, they can be used to create analytical models for the predictive determination of the quality of gray cast iron depending on the type of final structure. It is shown that the problem of reliable and most accurate quantitative determination of graphite inclusions in the structure of gray cast iron can be solved using the method of fractal analysis. The considered method for determining the fractal dimension can be useful when studying the features of structure formation processes and evaluating the evolution of graphite inclusions at different stages of gray cast iron processing, starting from the smelting stage and ending with the final heat treatment. In addition, fractal analysis can be used to determine and evaluate the influence of morphological parameters of graphite inclusions on the formation of gray cast iron quality indicators, which cannot be achieved using traditional methods of quantitative analysis. Further research will be aimed at establishing statistically significant correlations of the fractal dimension with the properties of gray cast irons, in particular the behavior of the hardness change taking into account the formation of mixed or transitional type structures.

**Key words:** fractal analysis, fractal dimension structure, gray cast iron, graphite inclusions, metal matrix

**For citation:** Parusov, E. V., Borisenko, A. Yu., Oliinyk, E. V., Chuiko, I. M., & Parusov, O. V. (2024). Application of fractal analysis for quantitative evaluation of graphite inclusions in the cast iron structure. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 644-655. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-644-655>.

Стаття надійшла до редакції збірника 06.10.2024 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)