

Застосування теорії фракталів до оцінки структури  
та властивостей металів

## Зміст

Вступ.....	3
1. Матеріали та методики дослідження.....	4
2. Фрактальний аналіз структури металів.....	5
3. Результати та їх обговорення.....	6
4. Фрактальний аналіз балової ферито-перлітної структури.....	11
Висновки.....	14
Список використаної літератури.....	15
Анотація.....	18

## Вступ

Встановити взаємно однозначну відповідність між структурою та властивостями металу не завжди можливо. Однією з причин цього є складна геометрична конфігурація форми елементів структури. Наприклад, у сталей, в основному, структура оцінюється за бальною шкалою або за процентним співвідношенням її елементів. Залишається недостатньо вивченим питання впливу форми елементів структури, яка змінюється в процесі її трансформації після різних режимів обробки. При трансформації форми елементів структури дуже часто змінюються і властивості досліджуваного металу. Зміна реальної форми елементів структури металу не завжди реєструється традиційними методами металографічного аналізу.

В даний час для ідентифікації багатопараметричних технологій використовуються різні підходи, які побудовані на неруйнуючих методах [1-3]. Наприклад, для прогнозу фізико-механічних характеристик різних матеріалів на підставі аналізу їх структури застосовуються методи математичного моделювання [4-6]. Застосування методик планування експериментів дозволяє оптимізувати склад матеріалів і визначити область існування їх субоптимальних властивостей [7, 8]. Використання математичних методів призводить до істотного скорочення витрат на натурні випробування.

Для часткової компенсації неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу в роботах [9, 10] пропонується використовувати мову фрактальної геометрії. Фрактальна геометрія, яку розробив Б. Мандельброт [11], дозволяє описувати чисельно неперекладні об'єкти за допомогою фрактальної (дробової) розмірності. Фрактальну розмірність використовують при прогнозі механічних властивостей сталей [12, 13] і чавунів [14-16]; при ранжируванні критеріїв якості металу [17]; при ідентифікації складних систем [18]; при регуляризації умовно некоректних задач матеріалознавства [19]. В даний час розроблені основи організації фрактального моделювання, що дозволяє для кожного об'єкта ідентифікації розробити алгоритм рішень [20, 21].

Застосування теорії фракталів та мультифракталів дозволяє встановити додаткові зв'язки між структурою та властивостями об'єкта ідентифікації. [22-24].

### 1. Матеріали та методики дослідження.

Об'єктом дослідження обрана інструментальна сталь У8. Актуальність вибору сталі У8 полягає в тому, що в процесі експлуатації вироби з неї (фрези, пили, накатні ролики, стамески, долота та ін.) піддаються динамічним навантаженням, які обумовлюють зміну структури, що впливає на її твердість.

Досліджувались зразки сталі У8 із наступним хімічним складом (% від маси): С – 0,81%; Si – 0,17%; Cu – 0,25%; Mn – 0,17%; Ni – 0,25%; P – 0,30%; Cr – 0,20%; S – 0,03%. Із ціллю змін структури та механічних властивостей зразки перетином 5×5 мм та довжиною 20 мм піддавалися термічній обробці за двома режимами (див. табл. 1). Твердість зразків після термічної обробки вимірювалася за методом Роквелла (ГОСТ 8.064-79) в різних по товщині областях зразків (табл. 1). Для підвищення надійності результатів в кожній з наведених областей проведено по три вимірювання показників твердості.

Таблиця 1

Режими термічної обробки та твердість сталі У8

№ п/п	Режим обробки	Розподіл HRC, $r$						
		$r$ (-1 см)	$\frac{1}{2} r$ (-0,5 см)	$\frac{1}{4} r$ (-0,25 см)	$r=0$ (0 см)	$\frac{1}{4} r$ (0,25 см)	$\frac{1}{2} r$ (0,5 см)	$r$ (1 см)
1	780°С, охолодження в маслі	68,7	68	66,4	66,1	67	67	68
2	780°С, охолодження у воді	73,5	72,3	73	70,5	71,5	72,5	73

Металографічний аналіз проводили на мікроскопі "Неофот 2" (Німеччина). Травлення шліфів здійснювалося в 4% розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Структура сталі приведена на рис. 1.

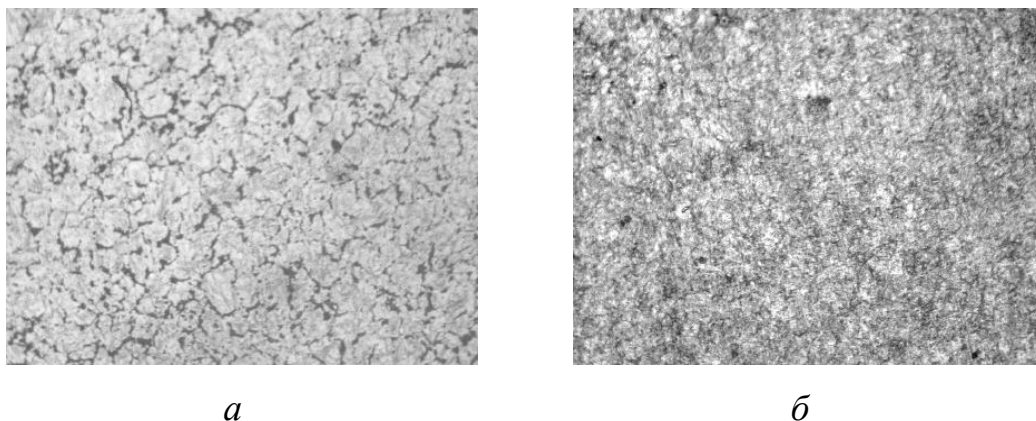


Рис. 1. Структура сталі У8 у центрі зразків ( $r = 0$  см):

*a* – охолодження в маслі: перліт, що виділився по границям колишніх аустенітних зерен та бейніт + мартенсит; *б* – охолодження у воді: мартенсит + залишковий аустеніт,  $\times 200$

## 2. Фрактальний аналіз структури металів.

Алгоритм розрахунку мультифрактального спектра розмірностей мікроструктури сталі У8 складався з наступних етапів [12]:

*1 етап.* Зображення структури ( $\times 200$ ) із вихідним розміром  $9 \times 12$  см сфотографовані цифровою камерою "Olympus C-50". В електронному варіанті фото представлені у вигляді двомірного масиву даних  $510 \times 680$  пікселей в 256-кольоровому форматі bmp із градацією сірого кольору.

*2 етап.* Проведення дискретної апроксимації цифрових фотознімків структур. При даному збільшенні структури розміри квадратних комірок змінювались від  $17,65 \times 17,65$  мкм при  $l_1 = 20$  пікселей (де  $l_k = 20, 25, \dots, 100$  при  $k = 1, 2, \dots, 17$ ). При даному збільшенні структури розміри квадратних комірок змінювались від  $17,65 \times 17,65$  мкм при  $l_1 = 20$  пікселей до  $88,25 \times 88,25$  мкм при  $l_{17} = 100$  пікселей із заданим кроком 5 пікселей (4,40 мкм).

*3 етап.* Визначався мультифрактальний спектр розмірностей  $D(q)$  (0) елементів структури.  $p_i$  - ймовірність попадання точки, що знаходиться на

досліджуваному об'єкті, в  $i$ -у комірку квадратної сітки з розміром  $\delta$ . Показник ступеня  $q$  змінювався в діапазоні від  $-50$  до  $+50$ .

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

де  $D_0$  - фрактальна розмірність, яка характеризує однорідний фрак тал при  $q = 0$  (розмірність Хаусдорфа – Безиковича);  $D_1$  - інформаційна розмірність при  $q = 1$  (інформаційна ентропія) характеризує швидкість зростання кількості інформації і показує, як зростає інформація, необхідна для визначення місця розташування точки, що знаходиться на об'єкті дослідження, коли розмір комірки  $\delta$  прямує до нуля.  $D_2$  - кореляційна розмірність, при  $q = 2$  характеризує ймовірність знаходження в одній і тій же клітинці сітки двох точок, що знаходяться на об'єкті спостереження;  $D_{50}$ - розмірність, що характеризує найбільш розріджений простір в об'єкті спостереження (світлі елементи об'єкта);  $D_{-50}$  - розмірність, що характеризує найбільш концентроване простір, що спостерігається в цьому об'єкті (темні елементи).

4 етап. Побудова залежності  $D(q)$ .

### 3. Результати та їх обговорення

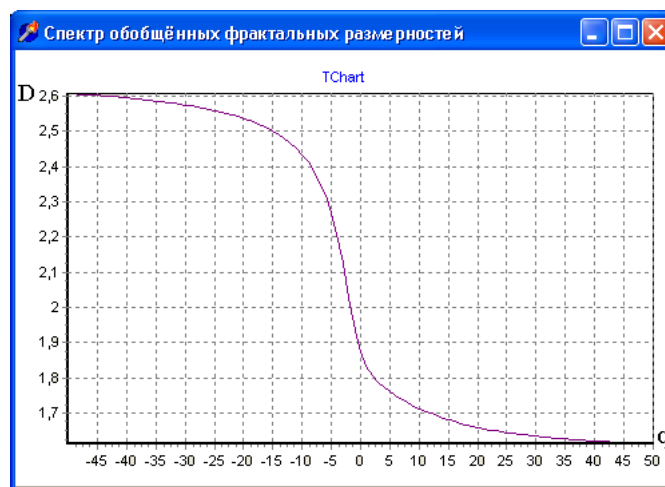


Рис. 2. Спектр розмірностей елементів структури, наведений на рис. 1 б

В результаті проведених експериментів визначено розмірності елементів досліджуваних мікроструктур (таблиця 2 і таблиця 3).

Таблиця 2

Сталь У8. Нагрів в печі до  $780^{\circ}\text{C}$ , з витримкою 30 хв. та охолодженням в маслі

Відстань $r$ від центра зразка	Спектр розмірностей мультифрактала				
	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_{50}$	$D_{-50}$
$l$	2	3	4	5	6
$r = 0$	1,844	1,820	1,812	1,715	2,700
$\frac{1}{2} r$	1,740	1,690	1,675	1,564	2,782
$r = 1$	1,675	1,620	1,615	1,464	2,940

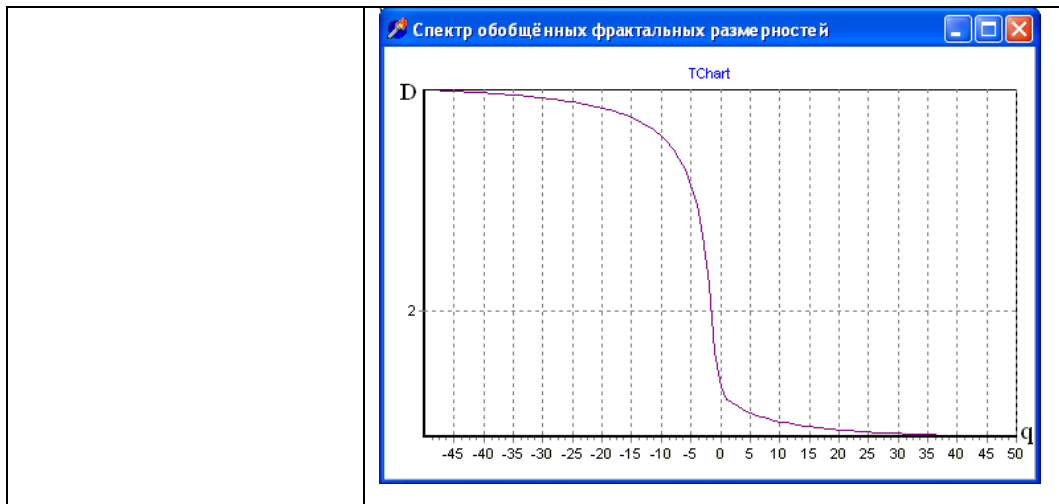
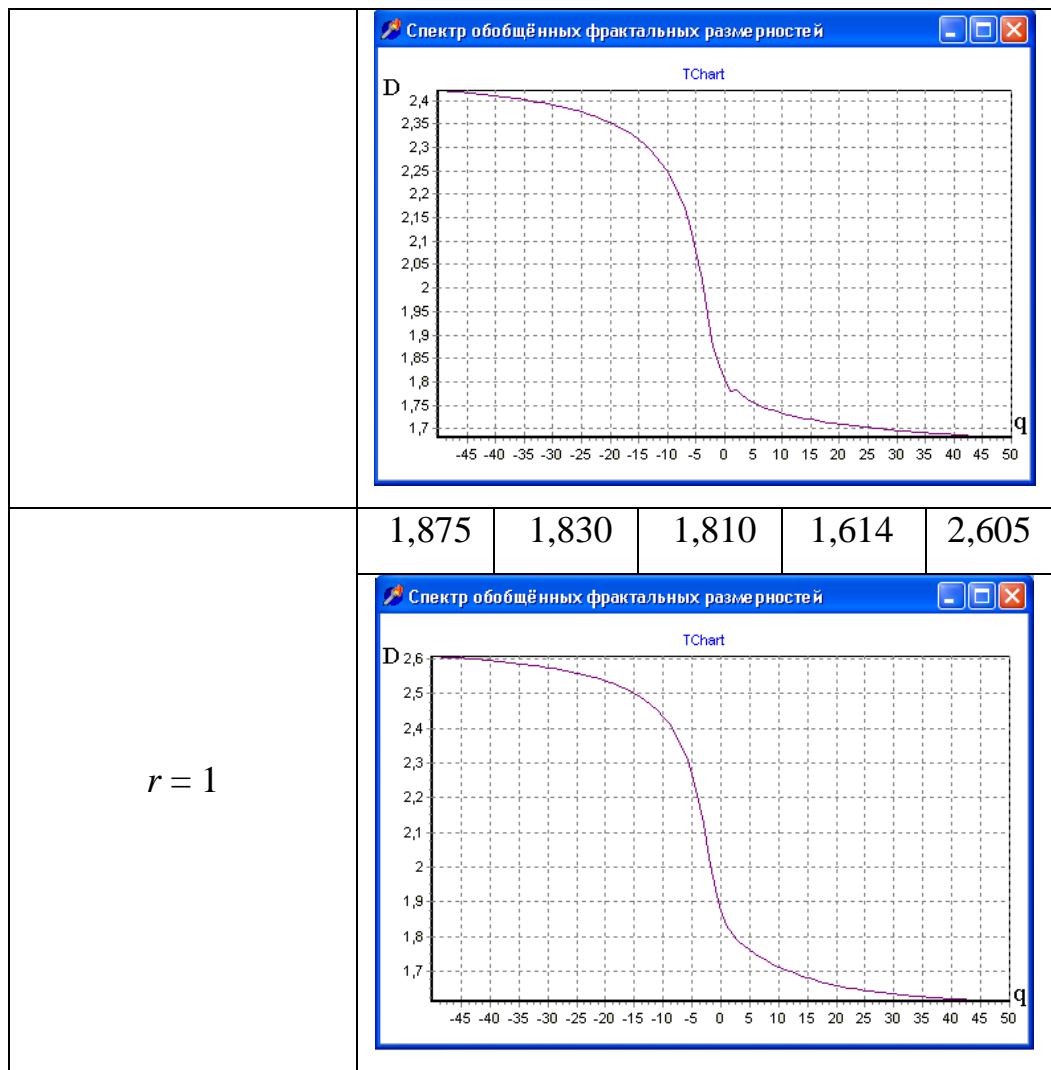


Таблица 3

Сталь У8. Нагрів в печі до 780<sup>0</sup>С, з витримкою 30 хв. та охолодженням у воді

Відстань $r$ від центра зразка	Спектр розмірностей мультифрактала				
	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_{50}$	$D_{-50}$
$l$	2	3	4	5	6
	1,785	1,752	1,735	1,635	2,550
$r = 0$					
$\frac{1}{2} r$	1,806	1,780	1,779	1,681	2,420





Для встановлення чутливості між параметрами структури і твердістю сталі У8 використовували формулу [20, 23, 24]:

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

де  $Y_i$  - чутливість;  $D_i$  – фрактальна розмірність в  $i$  – й точці шліфа;  $X_i$  – якісна характеристика в  $i$  – й точці шліфа.

На рис. 3 і рис. 4 наведені гістограми чутливості між розмірностями елементів структури з мультифрактального спектра і твердістю сталі У8, визначеної за формулою (2).

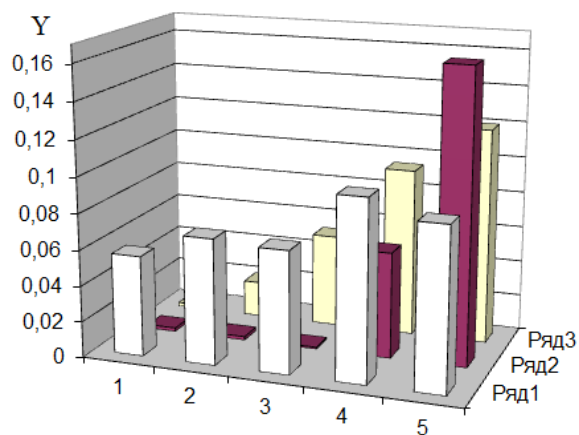


Рис. 3.Чутливість твердості до фрактальних розмірностей структури (мартенсит + перліт по границях зерен): Ряд 1-збільшення 100;  
Ряд 2-збільшення 200; Ряд 3-збільшення 400

З гістограми на рис. 3 випливає, що оптимальним масштабом представлення структури для визначення твердості на інтервалі від 100 до 400 разів є збільшення структури  $\times 100$ . Аналіз середніх значень узагальнених фрактальних розмірностей показав, що найбільш чутлива до темних включень (мартенсит + перліт по межах аустенітних зерен) є розмірність  $D_{.50}=0,126$ , з чого випливає, що для подальших розрахунків твердості необхідно використовувати дану розмірність. Ці результати підтверджуються фізико-хімічним впливом цих структур на твердість.

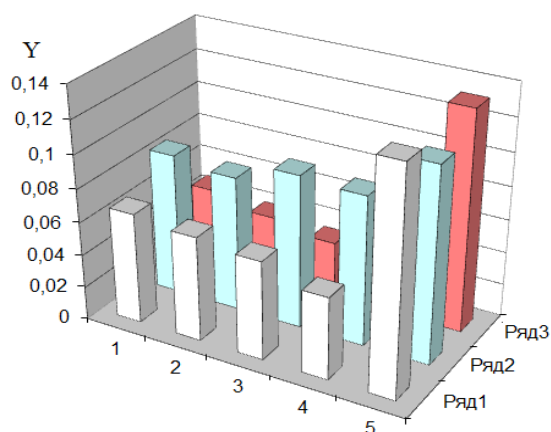


Рис. 4. Чутливість фрактальної розмірності  $D_0$  (1), інформаційної розмірності  $D_1$ (2), кореляційної розмірності  $D_2$  (3), розмірності  $D_{50}$  (4) та розмірності  $D_{.50}$  (5) до твердості мартенситу. Ряд 1-збільшення 100;  
Ряд 2-збільшення 200; Ряд 3-збільшення 400

Аналіз гістограми на рис. 4 показує, що висока в порівнянні з іншими чутливість до твердості спостерігається у фрактальній розмірності мартенситу  $D_{-50}$ . Фізично, цей факт пояснюється тим, що збільшення розмірності  $D_{-50}$ , характеризує найбільш концентрований простір (темні ділянки структури - голки мартенситу), пов'язане зі зростанням його твердості внаслідок зсувного механізму перебудови кристалічної ґратки ( $\gamma$ - $\alpha$  перетворення).

Отримані результати свідчать про чутливість показників якості вуглецевих сталей, на прикладі сталі У8, до розмірностей оцінок елементів структури. Подібний підхід дозволяє будувати прогноз якісних характеристик вуглецевих сталей на підставі мультифрактального аналізу їх структури.

#### 4. Фрактальний аналіз балової ферито-перлітної структури

Фотознімки ферито-перлітної структури досліджувалися з вмістом цих складових: від 0 до 100%. Залежно від кількості феритної або перлітної складових структура сталей підрозділяється на 10 балів згідно з таблицею 4 і наведеної на рис. 5 Шкала 7.

Таблиця 4

Відношення перліту та фериту [20]

Бал	Перліт, %	Ферит, %	Бал	Перліт, %	Ферит, %
	100	0	6	50	50
2	95	5	7	35	65
3	85	15	8	20	80
4	75	25	9	5	95
5	65	35	10	0	100

Згідно ГОСТ 8233 подібна шкала може використовуватися при визначенні кількості перліту і фериту незалежно від структури перліту, що зустрічається у вигляді пластин або зерен. Для оцінки різновидів структури перліту застосовуються інші шкали.

Фрактальна розмірність фотографій з ГОСТ 8233 визначалася за допомогою запатентованої і випробуваної методики [21]. Методика базується на пошуку збіжності результатів розрахунку фрактальної розмірності елементів структури, обчисленої за допомогою клітинного і точкового способів (рис. 6) [22].

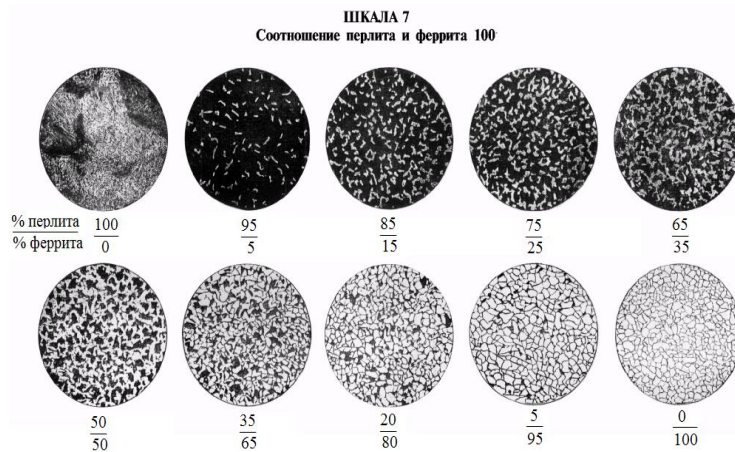


Рис. 5. Еталонна шкала 7, що використовується для відношення фериту та перліту [20]

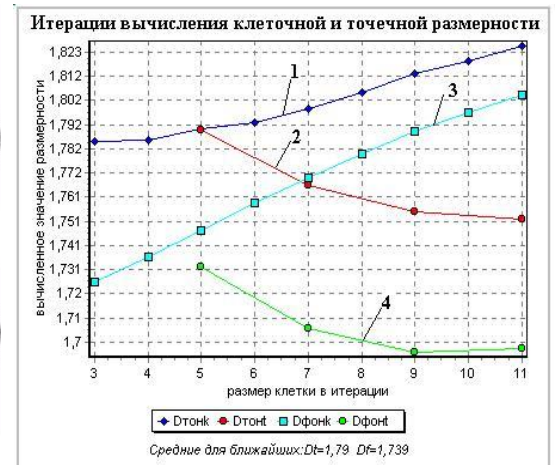


Рис. 6. Залежність фрактальної розмірності від розміру клітини [22]

На рисунку 6 лінії 1 і 2 показують зміна значень фрактальної розмірності в залежності від кроку і номера ітерації (розміру клітини) для тону (програма автоматично вибирає за тон темні об'єкти зображення), обчисленого за допомогою двох способів: клітинного  $D_{тон.К}$  та точкового  $D_{тон.т}$ . Аналогічна операція розрахунку проводиться для світлих об'єктів зображення (лінії 3 і 4 для значень  $D_{фон.К}$  та  $D_{фон.т}$ ). Такий підхід дозволяє визначити найбільш точне значення фрактальної розмірності, відповідне кожній структурі в залежності від розмірів її елементів. Лінії 1 та 2 показують збіжність на п'ятому кроці ітерації, при якому значення фрактальних розмірностей, обчислених двома способами, рівні відповідно: для клітинного способу  $D_{тон.К} = 1,831$  і для точкового способу  $D_{тон.т} = 1,831$ . Лінії 3 і 4 мають максимальну відповідність також на п'ятому кроці ітерації, при якому значення фрактальних розмірностей дорівнюють відповідно  $D_{фон.К} = 1,716$  та  $D_{фон.т} = 1,678$ .

Залежно від зростання бала ферито-перлітної структури з 1 до 10 фрактальна розмірність зерен фериту підвищується до 1,93 (рис. 7), а фрактальна розмірність зерен перліту зменшується з 1,96 до 1,29 (рис. 8). Одним з факторів підвищення фрактальної розмірності фериту служить % його вмісту від 0% за балом 1 до 100% за балом 10. Це можна пояснити підвищенням компактності заповнення простору феритом внаслідок його % -го вмісту (рис. 9). Відношення на рис. 7-10 описуються рівняннями (3-6) відповідно:

$$D = 0,0095n^2 - 0,0589n + 1,6507, R^2 = 0,57 \quad (3)$$

$$D = -0,0105n^2 + 0,0508n + 1,896, R^2 = 0,96 \quad (4)$$

$$D = 0,0041S + 1,5028, R^2 = 0,52 \quad (5)$$

$$D = 0,0053S + 1,491, R^2 = 0,83. \quad (6)$$

Винятком є відносно високий показник розмірності фериту 1,85 за балом 1 (рис. 7), оскільки при 100% -му вмісті перліту розглядається розмірність його феритної фази. Це відхилення показника фрактальної розмірності фериту забезпечило невисокий коефіцієнт парної кореляції  $R^2=0,57$  для рівняння регресії (3) і  $R^2=0,52$  для рівняння (5). Показники фрактальної розмірності фериту 1,31 за балом 2 і 1,45 за балом 3 (рис. 7) обумовлені його невисоким вмістом 5% та 15%. В цьому випадку вагомий внесок у фрактальну розмірність фериту вносять кордону зерен, довжина яких  $l$  пов'язана з  $D$  залежністю:  $L \sim \delta^D$ , де  $\delta$  - обраний при ітерації розмір ланки кордону зерна.

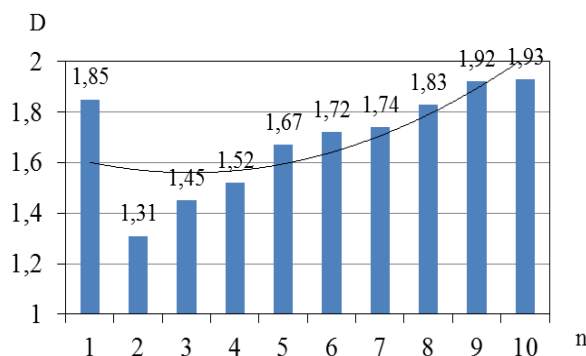


Рис. 7. Розподіл балів n від фрактальної розмірності D фериту

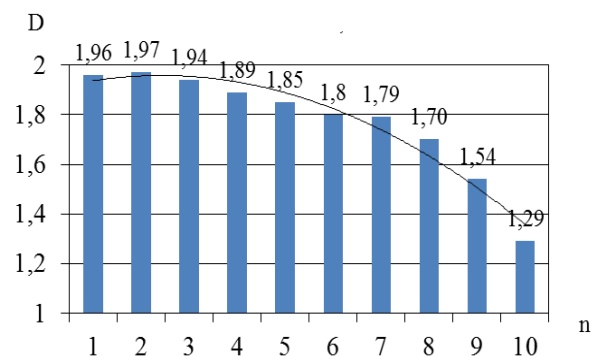


Рис. 8. Розподіл балів n від фрактальної розмірності D перліту

Зафіксовано зростання фрактальної розмірності зерен перліту при підвищенні його вмісту (рис. 10). Підвищення розмірності перліту також обумовлено підвищенням компактності заповнення ним двовимірного простору, оскільки при даному збільшенні перліту в 100 разів евтектоїдна суміш двох фаз - фериту і цементиту не розрізняється. В цьому випадку зерна перліту при розрахунку їх фрактальної розмірності ідентифікуються як темні включення.

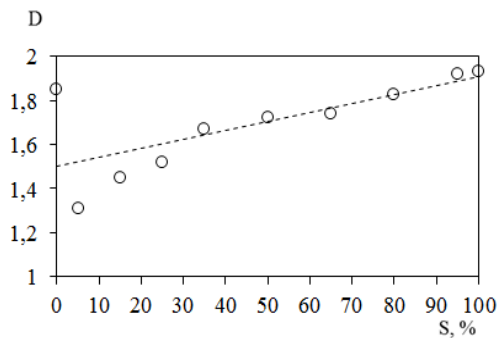


Рис. 9. Залежність фрактальної розмірності фериту від його вмісту

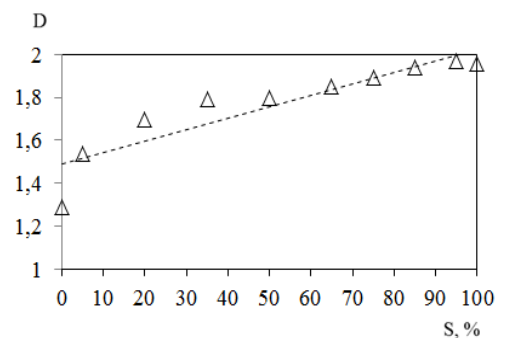


Рис. 10. Залежність фрактальної розмірності перліту від його вмісту

У висновку слід зазначити, що фрактальна розмірність зерен фериту і перліту може досягати топологічної розмірності 2 розглянутого простору внаслідок підвищення їх %-го вмісту. Це пояснюється підвищенням компактності заповнення простору феритом і перлітом відповідно. Оскільки фрактальна розмірність чутлива до зміни %-го складу фериту і перліту, а також бала зерна, то, відповідно, вона чутлива і до механічних характеристик сталей ([16]).

Встановлено співвідношення між еталонною шкалою 7 (ГОСТ 8233) і фрактальної розмірністю перліту і фериту. Отримані результати свідчать про підвищення фрактальної розмірності фериту і перліту внаслідок зростання їх %-го вмісту. Подібний підхід можна використовувати при прогнозі механічних характеристик сталей з ферито-перлітною структурою.

## Висновки

Розглянуто застосування мови фрактальної геометрії для оцінки структури та механічних властивостей сталей. Встановлена чутливість

показників твердості вуглецевої сталі У8 до спектру розмірностей її мікроструктури, що свідчить про можливість прогнозу критеріїв якості металів.

Отримані результати свідчать про чутливість показників якості вуглецевих сталей, на прикладі сталі У8, до фрактальної розмірності елементів структури. Подібний підхід дозволяє здійснювати прогноз якісних характеристик вуглецевих сталей на підставі мультифрактального аналізу елементів їх структури.

Проведено аналіз фрактальних розмірностей балової ферито-перлітної структури, що дозволяє застосовувати даний підхід в якості альтернативного для її кількісного аналізу.

### **Список використаної літератури**

1. Большаков В. І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. Етапи ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 66–72.
2. 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.
3. Kroviakov S., Mishutin A., Pishev O. Management of the Properties of Shipbuilding Expanded Clay Lightweight Concrete // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – [S.l.], Vol. 7. – № 3.2. – P. 245–249.
4. Mishutn A., Kroviakov S., Pishev O., Soldo B. Modified expanded clay light weight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures // Tehnički glasnik - Technical Journal. – 2018. – Vol. 11. – № 3. – P. 121–124.
5. Kroviakov S., Mishutn A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanyia. – 2017 – Vol. 1. – № 4. – P. 2–10.
6. Кровяков С. О. Порівняння ефективності застосування зерен пониженої пружності і дисперсного армування при керуванні властивостями

дрібнозернистого бетону // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.– Луганськ, 2010. – № 14. –С. 163–168.

7. 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 меж. сем. по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса : АстроПринт, 2006. – С. 146–150.

8. Дубров Ю. И., Волчук В. Н., Большаков В. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении // Моделирование и оптимизация в материаловедении : матер. к 40-му меж. сем. по моделированию и оптимизации композитов. - Одесса: АстроПринт, 2001. - С. 25-26.

9. Большаков Вад. І., Большаков В. І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу // Вісник НАН України. – 2014. – № 12. – С. 45–48.

10. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Материаловедческие аспекты применения частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 5. – С. 10–16.

11. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph. – □□New-York, San Francisco: Freeman, 1982. – 480 p.

12. Большаков В. И., Волчук В. Н. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33. – № 3. – С. 347-360.

13. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла // Доповіді НАН України. – 2017. – № 4. – С. 42-48.



14. Волчук В. Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла // *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2014. - № 3. – С. 12–19.

15. Волчук В. Н. Определение чувствительности мультифрактальных характеристик металла // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – 2015. – № 12. – С. 10–14.

16. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов / В.Н. Волчук. // *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2015. – №3. – С. 5–11.

17. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2017. – Т. 39. – № 7. – С. 949-957.

18. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем // *Доповіді НАН України.* – 2017. – № 6. – С. 46-50.

19. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov, Yu. I. (2018). Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2018. – Vol. 40. – № 9. – P. 1165–1171.

20. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Основы организации фрактального моделирования. – Киев: Академперіодика, 2017. – 170 с.

21. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Организация фрактального моделирования // *Доповіді НАН України.* – 2018. – № 6. – С. 67-72.

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

23. Большаков В., Волчук В., Дубров Ю. Пути применения теории фракталов. – Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016. – 146 p.

24. 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. – P. 93–97.

## **Анотація**

**Актуальність роботи.** Розробка підходів до оцінки структури та властивостей неруйнівними методами є перспективним напрямком сучасного матеріалознавства. Для прогнозу критеріїв якості застосовують різні математичні моделі, що дозволяють економити кошти на проведення натурних іспитів. На основі аналізу літературних джерел визначено, що перспективним підходом являється оцінка структури та властивостей різних матеріалів з використанням фрактальної геометрії. Її застосування дозволяє оцінювати елементи структури металів зі складною конфігурацією форми, тому фрактальний підхід застосовано до аналізу структури сталі У8 та ферито-перлітної шкали згідно з ГОСТ 8233. Встановлено чутливість твердості металу до спектру розмірностей, що дозволяє застосовувати даний підхід до прогнозу механічних властивостей сталей.

**Мета роботи.** Встановити чутливість критеріїв якості сталей до фрактальних розмірностей елементів їх структури.

**Завдання наукової роботи.** В роботі вирішувалися наступні завдання:

1. Визначити актуальність застосування фрактальної геометрії до моделювання структури та властивостей металів.
2. Провести оцінку структури сталі У8 після термічної обробки шляхом визначення фрактальної розмірності елементів її структури.
3. Встановити чутливість твердості сталі У8 до спектру розмірностей елементів її структури.
4. Провести дослідження на предмет можливості застосування фрактальної геометрії як альтернативної методики кількісної оцінки балової ферито-перлітної шкали згідно з ГОСТ 8233.

**Загальна характеристика наукової роботи.** Загальний обсяг роботи складає 17 сторінок. Наукова робота містить в собі: вступ; чотири розділи; висновки; список використаних джерел, що включає 24 найменування. У вступі розглядається актуальність застосування фрактальної геометрії до моделювання структури та властивостей металів. У першому розділі роботи

наведені матеріали та методики дослідження. У другому розділі описано алгоритм розрахунку мультифрактального спектра розмірностей мікроструктури сталі У8. У третьому розділі описана методика встановлення чутливості елементів структури сталі У8 після термічних обробок та показана доцільність застосування фрактальної геометрії для прогнозу критеріїв якості металів. В четвертому розділі проведено фрактальний аналіз балової ферито-перлітної структури. Отримані результати при фрактальному аналізі шкали 7 співвідношення фериту і перліту згідно ГОСТ 8233 свідчать про можливість використання їх фрактальної розмірності в якості індикатора структурних трансформацій. Подібний підхід можна застосовувати як альтернативний метод кількісної оцінки структури при прийнятно-здавальних роботах сталей з ферито-перлітною структурою.

**Методика дослідження.** Застосовувалися методики оптичної мікроскопії, натурних іспитів, розроблена та запатентована методика обчислення фрактальних розмірностей елементів структури матеріалів, математичне моделювання.

**Ключові слова:** фрактал, мікроструктура, механічні властивості, сталь У8, прогноз.