

УДК 620.175:669.15

**Діана Глушкова¹, д.т.н., проф.; Володимир Волчук², д.т.н., проф.;
Ігор Тимченко², аспірант, Сергій Мариненко³, к.т.н., доц.;
Тарас Майданчук⁴, к.т.н., доц.; Ігор Коваль³, к.т.н., доц., Ліна Петречук⁵, ст.
викладач**

¹Харківський національний автомобільно- дорожній університет, 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, Україна

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, 49600, м. Дніпро, вул. Архітектора О. Петрова, 24-а, Україна

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

⁴Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11, Україна

⁵ННІ Дніпровський металургійний інститут УДУНТ, Проспект Науки 4, 49005 м. Дніпро, Україна.

ВСТАНОВЛЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ТВЕРДОСТІ ДО СТРУКТУРИ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Анотація. У статті досліджено можливості фрактального аналізу як ефективного інструменту для кількісної характеристики мікроструктури та прогнозування комплексу механічних властивостей середньовуглецевих конструкційних сталей. Актуальність роботи пов'язана з потребою у створенні швидких, об'єктивних і недеструктивних методів оцінки якості металопродукції безпосередньо за параметрами структури в умовах реального виробництва. Встановлено чутливість між фрактальними характеристиками окремих фаз і межами зерен та твердістю середньовуглецевих конструкційних сталей. Розроблений підхід може бути використаний для встановлення зв'язку між структурою сталей та їхніми властивостями.

Ключові слова: конструкційні сталі, мікроструктура, чутливість, мультифрактальний аналіз, твердість.

Diana Hlushkova, Volodymyr Volchuk, Igor Tymchenko, Serhii Marynenko, Taras Maydanchuk, Ihor Koval, Lina Petrechuk

ESTABLISHING THE SENSITIVITY OF HARDNESS TO THE MICROSTRUCTURE OF MEDIUM-CARBON STEELS

Abstract. The article investigates the capabilities of fractal analysis as an effective tool for the quantitative characterization of microstructure and the prediction of a set of mechanical properties of medium-carbon structural steels. The sensitivity between the fractal characteristics of individual phases, grain boundaries, and the hardness of medium-carbon structural steels has been established. The developed approach can be used to determine the relationship between the structure of steels and their properties.

Keywords: structural steels, microstructure, sensitivity, multifractal analysis, hardness.

Вступ. Структура матеріалу є одним із ключових факторів, що визначає його фізико-механічні властивості [1]. Традиційні методи кількісного аналізу мікроструктури металів, такі як стереологічний аналіз, рентгеноструктурний та електронно-мікроскопічний методи, забезпечують важливу інформацію, але часто не дозволяють повною мірою описати складну геометрію та просторову організацію структурних елементів [2].

Фрактальний аналіз розширює можливості класичного підходу, дозволяючи враховувати неоднорідність розподілу структурних елементів у матеріалі. У попередніх дослідженнях показано високу ефективність фрактальних параметрів для прогнозування механічних властивостей різних матеріалів, зокрема металів і сплавів [4].

Метою роботи є встановлення чутливості між фрактальними характеристиками мікроструктури конструкційних сталей та їх основними механічними властивостями на прикладі середньовуглецевих сталей.

Методики і матеріали. Пасивний експеримент проводили на середньовуглецевих сталях. Вибір саме цих марок був зумовлений наявністю у науковій літературі достатньо великого масиву достовірних даних щодо мікроструктури та відповідних механічних властивостей (зокрема, твердості), визначених у конкретних ділянках зразків [20]. Це дозволило провести перевірку запропонованого підходу на незалежному експериментальному матеріалі.

Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Хімічний склад сталей 1-4 (мас. %)

Номер сталі	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
1	0,29	0,30	0,42	0,02	0,02	0,11	0,24
2	0,35	0,22	0,51	0,04	0,01	0,15	0,22
3	0,42	0,18	0,69	0,03	0,04	0,13	0,20
4	0,45	0,20	0,64	0,05	0,03	0,12	0,18

Мікроструктуру досліджували методами оптичної мікроскопії з подальшою цифровою обробкою зображень. Фрактальну розмірність визначали комбінованим методом на основі найкращої збіжності клітинного та точкового способів [19]. Для виявлення найбільш чутливої структурної складової використовували коефіцієнт чутливості:

$$K = |D_n - D_{n+1}| / |M_n - M_{n+1}| \quad (1)$$

де D_n і D_{n+1} – фрактальні розмірності елементів структури в двох реперних точках; M_n і M_{n+1} – механічні властивості в цих точках.

Аналіз гістограм коефіцієнта чутливості (рис. 1) наочно демонструє різний ступінь впливу окремих структурних складових на твердість сталей з ферито-перлітною структурою.

З отриманих даних випливає, що для сталі 1 найбільшу чутливість до твердості проявляє фрактальна розмірність границь зерен феррито-перлітної структури. Для сталі 2 домінуючий вплив має фрактальна розмірність перлітної складової, а для сталі 3 – фрактальні розмірності як перліту, так і ферриту, а для сталі 4 - фрактальні розмірності фериту.

На підставі результатів пасивного експерименту були отримані регресійні залежності (2), в яких твердість виступає функцією цілі, а аргументами є фрактальні розмірності найбільш чутливих структурних складових:

$$\begin{cases} HV = 116,12D_g^{1,172} - \text{steel 1} \\ HV = 4402D_p^2 - 15714D_p + 14224 - \text{steel 2} \\ HV = 1345,8D_p^2 - 4688,6D_{pp} + 4327 - \text{steel 3} \\ HV = -3010,4D_f^2 + 10184D_f - 8451,6 - \text{steel 4} \end{cases} \quad (2)$$

де HV – твердість за Віккерсом; D_f – фрактальна розмірність фериту; D_p – фрактальна розмірність перліту; D_g – фрактальна розмірність границь зерен ферито-перлітної структури.

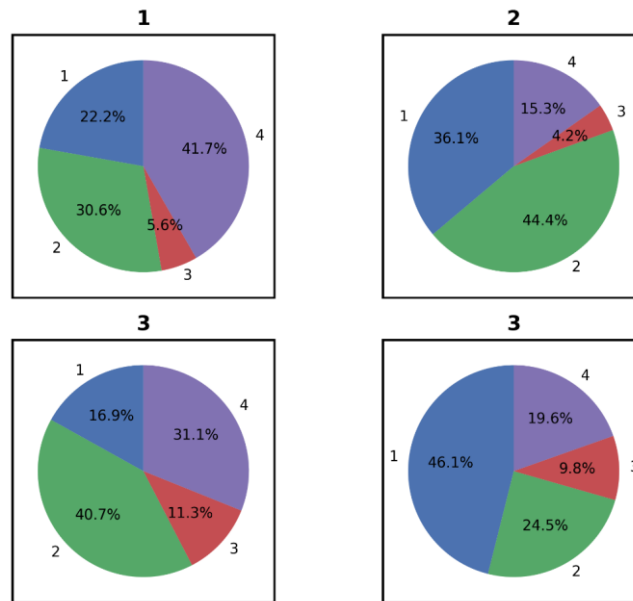


Рисунок 1. Гістограми чутливості фрактальної розмірності фериту (1), перліту (2), середнього значення фаз (3) та границь зерен (4) до твердості HV сталей 1-4.

Отримані результати підтвердили наявність стійкого кількісного взаємозв'язку між фрактальною розмірністю ключових структурних складових та механічними властивостями середньовуглецевих сталей, що стало важливим етапом обґрунтування працездатності запропонованого методу.

Висновки

У результаті дослідження встановлено високу ефективність фрактального аналізу для кількісної оцінки мікроструктури та прогнозування механічних властивостей середньовуглецевих конструкційних сталей.

Виявлено чіткий кількісний зв'язок між фрактальними характеристиками фериту, перліту та границь зерен і твердістю сталей. Показано, що чутливість різних структурних складових до твердості залежить від хімічного складу сталі.

Розроблено коефіцієнт чутливості, який дозволяє визначати найбільш інформативні структурні параметри. Отримані регресійні залежності підтверджують можливість надійного прогнозування твердості на основі фрактальної розмірності мікроструктури.

Перелік посилань

1. Yuan, M., Zhang, L., Wan, J., Li, Yu, Xu, W., Qi Y., Xie, Z., Xu, W. *Structures*, **75**, 108677 (2025) <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108677>
2. C. Ding, L. Jiang, J. Xu, S. Guo, J. Zhang, P. Xiong, Z. Piao, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **35**(08), 2550098 (2025) <https://doi.org/10.1142/S0218127425500981>
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>