

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.070720.31.638

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВУГЛЕЦЮ НА ФРАКТАЛЬНУ РОЗМІРНІСТЬ СТАЛІ

ВОЛЧУК В. М.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
ІВАНЦОВ С. В.², канд. техн. наук, доц.,
ТЮТЕРЕВ І. А.³, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

² Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

³ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

Анотація. *Вступ.* У результаті формування структури сталей у відкритих системах їх елементи досить часто мають складну геометричну конфігурацію. Із цих позицій апроксимація структурних складових фігурами Евкліда вносить похибку і їх аналіз. Вуглець – один з основних компонентів хімічного складу сталей, що значною мірою впливає на їх структуру та службові характеристики. Запропоновано дослідити вплив вуглецю на фрактальну розмірність сталі. *Матеріали та методика.* Як матеріал для дослідження обирались сталі СтЗпс, 20, 40 та У8. Сталі мали феритно-перлітну структуру. Хімічний склад сталей змінювався в межах існуючих ГОСТ. Фрактальна розмірність феритно-перлітної структури визначалася за допомогою розробленого способу, що базується на збіжності клітинної та точкової розмірностей. *Результати експерименту.* Отримано залежності, що описують зв'язок між вмістом вуглецю в межах 0,14...0,84 % та фрактальною розмірністю перліту, фериту і меж їх зерен. Ці залежності мають експоненціальний вигляд завдяки збільшенню вмісту перліту до граничних значень, що спостерігається в евтектоїдних сталях. Коефіцієнти парної кореляції отриманих експоненціальних моделей змінюються в межах 0,75...0,80, що підтверджує вплив вмісту перліту в сталі на його фрактальну розмірність. Порівняльний аналіз фрактальних розмірностей феритно-перлітної структури з показниками твердості НВ сталей після відпалу згідно зі штатною технологією виробництва свідчать про існування чутливості між цими показниками. *Висновки.* Досліджено вплив вуглецю на феритно-перлітну структуру доевтектоїдної та евтектоїдної сталі, що фіксується за допомогою фрактальної розмірності. Отримані результати можна використовувати в дослідженнях впливу вуглецю на геометричну форму перліту, фериту та границь зерен.

Ключові слова: *фрактальна розмірність; вуглець; перліт; твердість; модель*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА НА ФРАКТАЛЬНУЮ РАЗМЕРНОСТЬ СТАЛИ

ВОЛЧУК В. Н.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
ІВАНЦОВ С. В.², канд. техн. наук, доц.,
ТЮТЕРЕВ І. А.³, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

² Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

³ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

Аннотация. *Введение.* В результате формирования структуры сталей в открытых системах их элементы зачастую имеют сложную геометрическую конфигурацию. С этих позиций аппроксимация структурных

составляющих фигурами Евклида вносит погрешность при их анализе. Углерод является одним из основных компонентов химического состава сталей, в значительной мере влияет на их структуру и служебные характеристики. В работе предложено исследовать влияние углерода на фрактальную размерность стали. **Материалы и методика.** В качестве материалов для исследования выбирались стали СтЗпс, 20, 40 и У8. Сталь имела ферритно-перлитную структуру. Химический состав сталей менялся в пределах существующих ГОСТ. Фрактальная размерность ферритно-перлитной структуры определялась с помощью разработанного способа, основанного на сходимости клеточной и точечной размерностей. **Результаты эксперимента.** Получены зависимости, описывающие связь между содержанием углерода в пределах 0,14...0,84 % и фрактальной размерностью перлита, феррита и границ их зерен. Эти зависимости имеют экспоненциальный вид благодаря увеличению содержания перлита к предельным значениям, что наблюдается в эвтектоидных сталях. Коэффициенты парной корреляции полученных экспоненциальных моделей изменяются в пределах 0,75...0,80, что подтверждает влияние содержания перлита в стали на его фрактальную размерность. Сравнительный анализ фрактальных размерностей ферритно-перлитной структуры с показателями твердости HB сталей после отжига согласно штатной технологии производства свидетельствуют о существовании чувствительности между этими показателями. **Выводы.** В работе исследовано влияние углерода на ферритно-перлитную структуру доэвтектоидной и эвтектоидной стали, которое фиксируется с помощью фрактальной размерности. Полученные результаты можно использовать при исследованиях влияния углерода на геометрическую форму перлита, феррита и границ зерен.

Ключевые слова: *фрактальная размерность; углерод; перлит; твердость; модель*

STUDY OF THE EFFECT OF CARBON ON THE FRACTAL DIMENSION OF STEEL

VOLCHUK V.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
IVANTSOV S.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TIUTIERIEV I.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Materials Science, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

² Department of Materials Science, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: serhii.v.ivantsov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

³ Department of Materials Science, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

Abstract. Introduction. As a result of the formation of the steel structure in open systems, their elements often have a complex geometric configuration. From these positions, the approximation of structural components by Euclidean figures introduces an error in their analysis. Carbon is one of the main components of the chemical composition of steels, significantly affects their structure and performance characteristics. It is proposed to study the effect of carbon on the fractal dimension of steel. **Materials and methodology.** As the materials for the study, СтЗпс, 20, 40, and У8 steels were chosen. Steel had a ferrite-pearlite structure. The chemical composition of steels has changed within the existing industry standard (ГОСТ). The fractal dimension of the ferrite-pearlite structure was determined using the developed method based on the convergence of the cellular and point dimensions. **The results of the experiment.** Dependencies are obtained that describe the relationship between the carbon content in the range 0,14...0,84 % and the fractal dimension of perlite, ferrite and their grain boundaries. These dependencies have an exponential form due to an increase in the perlite content to the limiting values that is observed in eutectoid steels. The pair correlation coefficients of the obtained exponential models vary within 0,75...0,80, which confirms the influence of the perlite content in steel on its fractal dimension. A comparative analysis of the fractal dimensions of the ferrite-pearlite structure with hardness indices of HB steels after annealing according to standard production technology indicates the existence of sensitivity between these indices. **Conclusions.** The influence of carbon on the ferrite-pearlite structure of the hypereutectoid and eutectoid steel, which is fixed using the fractal dimension, is studied. The results can be used to study the effect of carbon on the geometric shape of perlite, ferrite and grain boundaries.

Keywords: *fractal dimension; carbon; perlite; hardness; model*

Вступ. Усі матеріали, що призначення, відповідають певним вимогам виготовляються зі сталей різного щодо існуючих стандартів та штатної

технології їх виготовлення. Зі сталей виготовляється багато матеріалів для народного господарства, тому контролю їх якості приділяється велика увага [1]. Значно впливають на характеристики якості матеріалів впливають їх склад [2; 3] і структура [4; 5].

Пошуку зв'язку між хімічним складом, структурою та критеріями якості сталей присвячено багато праць, наприклад, [6–9]. Останнім часом активно застосовують для моделювання структури і властивостей матеріалів фрактальний формалізм [10]. Теорію фракталів використовують у ранжуванні критеріїв якості багатопараметричних технологій чавунних валків [11], керамзитобетонів [12]; прогнозуванні критеріїв якості металів [13–15].

Стосовно хімічного складу сталей слід зазначити, що вміст у них вуглецю визначає спектр їх фізичних, механічних, службових та низки інших характеристик. У сталях вуглець (атомний радіус 0,067 нм) розчиняється в решітці заліза

(атомний радіус 0,156 нм) за типом упродовження [16]. Його присутність у металі ідентифікується за допомогою різних методів досліджень, наприклад, рентгеноструктурного аналізу, мікроскопії. При кристалізації сталей вуглець впливає на формування елементів структури. Елементи структури – їх вміст, форма, розподіл по об'єму, розміри та інші характеристики – впливають на властивості, зокрема, на механічні [17–19].

На основі вищевикладеного матеріалу запропоновано провести дослідження щодо впливу вуглецю на фрактальну розмірність доєвтектонічних та евтектонічних сталей різного призначення із застосуванням фрактального підходу.

Матеріали та методика. Для дослідження впливу вуглецю на фрактальну розмірність феритно-перлітної структури обиралися такі марки сталей господарського призначення: Ст3 (ГОСТ 380-2005), 20 (ГОСТ 1050-88), 40 (ГОСТ 1050-88), У8 (ГОСТ 1435-99) (див. табл.).

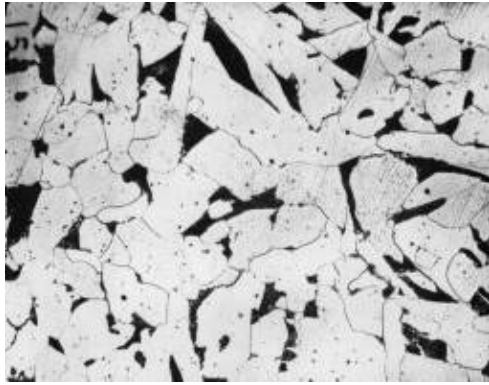
Таблиця

Процентний вміст хімічного складу сталей

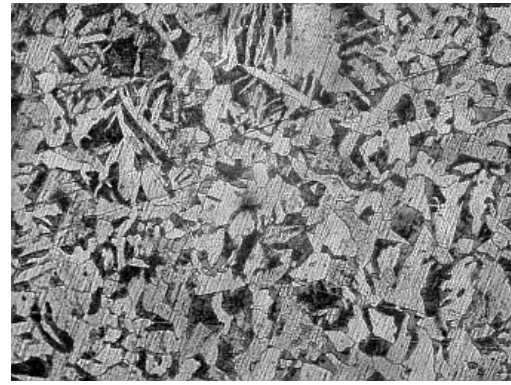
Сталь	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Ст3пс	0,14...0,22	0,15...0,30	0,40...0,65	до 0,30	до 0,05	до 0,04	до 0,3	до 0,3	до 0,08
20	0,17...0,24	0,17...0,37	0,35...0,65	до 0,25	до 0,04	до 0,04	до 0,25	до 0,25	до 0,08
40	0,37...0,45	0,17...0,37	0,50...0,80	до 0,30	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,30	до 0,08
У8	0,75...0,84	0,17...0,33	0,17...0,33	до 0,25	до 0,028	до 0,03	до 0,20	до 0,25	–

Сталь Ст3пс піддавалася такому режиму термообробки: нагрівання до 930 °С та гартування у воді до температури 650 °С з наступним охолодженням на повітрі до кімнатної температури (рис. 1 а). Структура сталі 20 (рис. 1 б) та сталі 40 (рис. 1 в) досліджувалась після

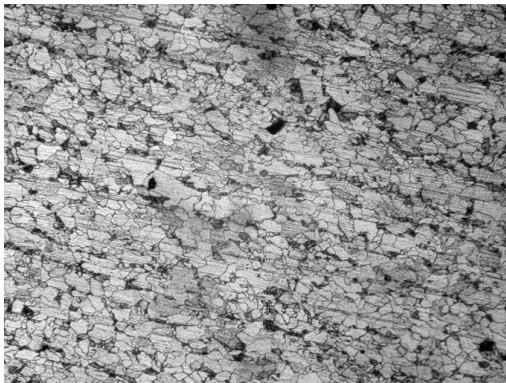
заводської поставки. Термообробка сталі У8 (рис. 1 г) проводилася за таким режимом: нагрівання до 780 °С з витримкою в печі 30 хв та наступним охолодженням на повітрі. У всіх розглянутих випадках перліт мав пластинчасту форму.



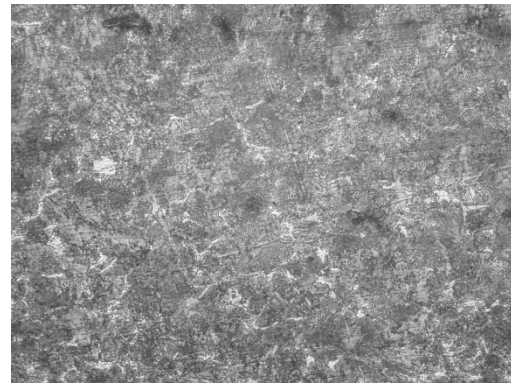
a, x 500



б, x300



в, x400

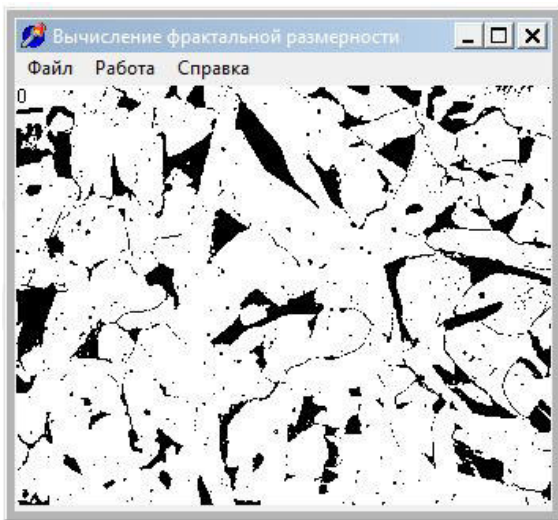


г, x400

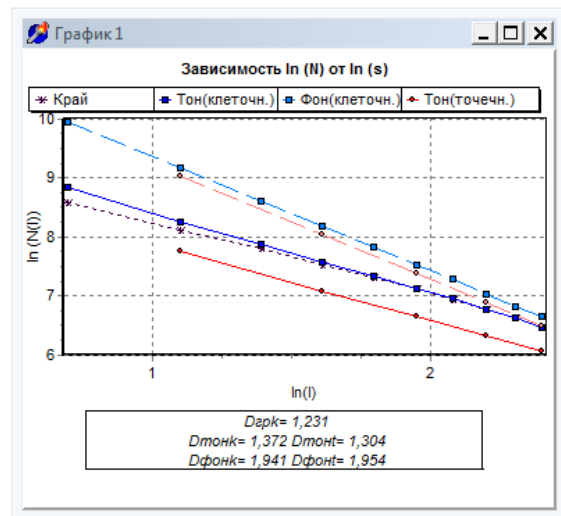
Рис. 1. Мікроструктура сталі Ст3пс (а), 20 (б), 40 (в), У8 (г)

Для розрахунку фрактальної розмірності фериту, перліту та меж зерен застосовували спосіб, де розрахунок розмірності проводився клітинним та точковим методами [20].

Результати розрахунку фрактальної розмірності мікроструктури сталі Ст3пс наведені на рисунку 2. Обробка фотознімків мікроструктури сталей здійснювалася в 256-колірному форматі *bmp*.



a

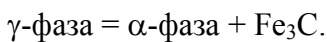


б

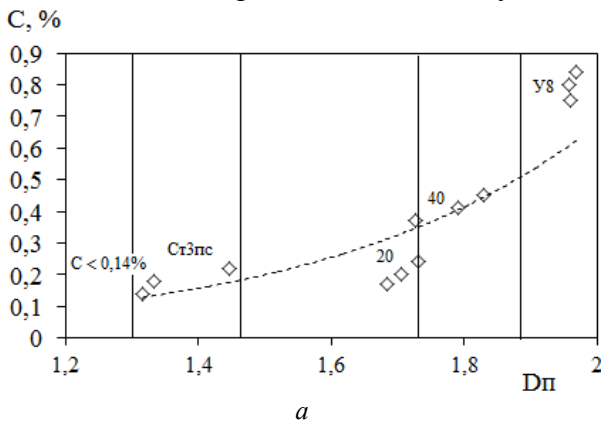
Рис. 2. Спосіб розрахунку фрактальної розмірності мікроструктури сталі Ст3пс: інтерфейс програми (а) та графік залежності $\ln N$ (δ)

Залежність кількості клітинок N , в які потрапила хоча б одна точка досліджуваного об'єкта, від лінійних розмірів клітинки l в пікселях наведена на рисунку 2 б. D_{grk} – фрактальна розмірність меж зерен феритно-перлітної структури; D_{monk} та D_{mont} – фрактальна розмірність перліту; обчислена клітинним і точковим методами відповідно; $D_{фонк}$ та $D_{фонт}$ – фрактальна розмірність фериту, обчислена клітинним і точковим методами відповідно. За фрактальну розмірність елементів структури обиралися та розмірність, яка визначалася як найближче середнє значення клітинної та точкової розмірності на n -му кроці обчислень.

Результати експерименту. Аналіз отриманих співвідношень між вмістом вуглецю в доевтектоїдних та евтектоїдній сталях свідчить про те, що зв'язок між цими величинами не описується лінійними моделями. У феритно-перлітній структурі вуглець здебільшого міститься в перліті, що складається з фази фериту (α -фаза, яка містить $\sim 0,0025$ % C) та цементиту (хімічна сполука Fe_3C , що містить 6,67 % C). Перлітне перетворення в сталі (евтектоїдний розпад) відбувається нижче температури 727 °C шляхом розпаду аустеніту (γ -фази, що містить 0,8 % C) на ферит та цементит [9]:



Перліт має відносно високі показники твердості (200 НВ) та текучості ($\sigma_{0,2} = 300$ МПа) [9], тому його геометричні характеристики, що залежать від кількості вуглецю та термодинамічних умов



формування структури, великою мірою визначають властивості металу.

Згідно з результатами праці [21] фрактальна природа властива багатьом структурам сталей, зокрема, феритно-перлітним. У разі збільшення вмісту перліту до граничних значень в евтектоїдних сталях лінійна залежність, як свідчать результати експерименту, переходить в експоненціальну (рис. 3 а). На площині фрактальна розмірність перліту або будь-якого іншого елемента структури може набувати граничного значення за зміни нерівновісної форми на рівновісну, що відповідає евклідовій розмірності площини шліфа $d = 2$ [22]. Аналогічна експоненціальна залежність спостерігається у співвідношенні між фрактальною розмірністю фериту і вмістом вуглецю (рис. 3 б).

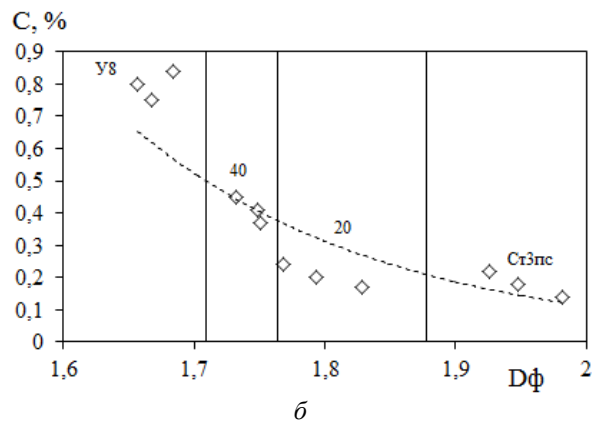
Із застосуванням регресійного аналізу отримано рівняння (1–3), що описують відношення між вмістом вуглецю в досліджуваних марках сталей (C, %) та фрактальною розмірністю перліту Dn , фериту $D\phi$ і межами їх зерен D_{grk} . Коефіцієнти парної кореляції рівнянь (1–3) свідчать про наявність впливу вуглецю:

$$Dn = 0,0052 \cdot e^{2,4296C} \quad R^2 = 0,75 \quad (1)$$

$$D\phi = 3373,6 \cdot e^{-5,159C} \quad R^2 = 0,78 \quad (2)$$

$$D_{grk} = 0,005 \cdot e^{2,6823C} \quad R^2 = 0,80 \quad (3)$$

Зв'язок між межами зерен фериту і перліту та вмістом вуглецю описується залежністю (3), що має також експоненціальний вигляд (рис. 3 в).



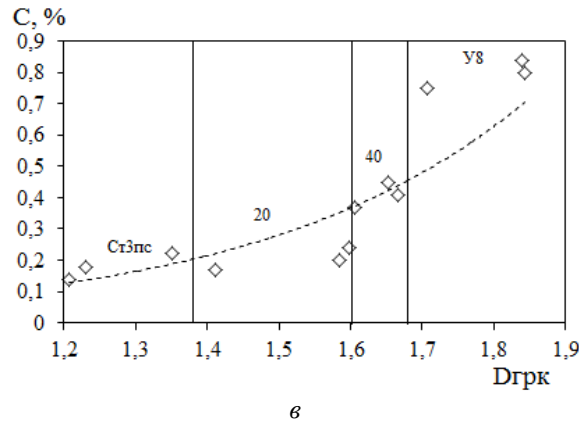


Рис. 3. Залежність фрактальної розмірності перліту (а), фериту (б) та меж зерен (в) від кількості вуглецю в сталях

Межі зерен являють собою дефекти кристалічної будови, тому їх вплив на механічні характеристики сталей досить значний. Оскільки процес визначення довжини меж зерен за допомогою традиційних методів кількісної металографії, з огляду на їх дисперсність та конфігурацію форми, досить складний та трудомісткий, із цих позицій отриману модель (3) можна застосовувати в рамках кількісного індикатора змін зеренної структури.

Опираючись на дані з нормативних документів (ГОСТ), що зазначені в розділі «Матеріали та методики», провели порівняльний аналіз фрактальних розмірностей феритно-перлітної структури з показниками твердості НВ за Брінеллем (рис. 4). Показники НВ сталей визначалися після відпалу згідно зі штатною технологією виробництва металопрокату.

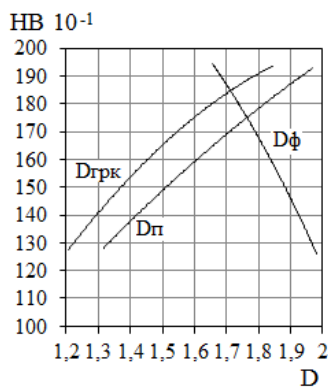


Рис. 4. Співвідношення між фрактальною розмірністю перліту (D_n), фериту (D_f), межами зерен ($D_{грк}$) та твердістю

Наведені на рисунку 4 результати свідчать про чутливість показників твердості до фрактальної розмірності феритно-перлітної структури (4–6), що підтверджується експериментальними даними праць із фрактального моделювання структури та механічних характеристик маловуглецевих марок сталей Ст3пс [23] та 20 [24]:

$$D_n = -27,69C^2 + 190,09C - 74,038 \quad R^2 = 0,90 \quad (4)$$

$$D_f = -210,19C + 544,55 \quad R^2 = 0,92 \quad (5)$$

$$D_{грк} = -72,10C^2 + 323,69C - 158,13 \quad R^2 = 0,88 \quad (6)$$

Результати дослідження підтверджують можливість застосування теорії фракталів до оцінювання впливу вуглецю на феритно-перлітну структуру залежно від його вмісту в діапазоні значень з 0,14 до 0,84 %.

Висновки. Досліджено вплив вмісту вуглецю в доевтектоїдній та евтектоїдній сталях на фрактальну розмірність феритно-перлітної структури. Встановлено в межах експерименту, що збільшення процентного вмісту тієї чи іншої структурної складової викликає збільшення її фрактальної розмірності. Цей факт можна пояснити збільшенням компактності заповнюваного простору на площині шліфа тією чи іншою структурною складовою шляхом збільшення її вмісту. Підвищення фрактальної розмірності меж зерен зумовлене зменшенням їх лінійних розмірів, зміною їх конфігурації та зростанням довжини.

Отримані моделі оцінювання кількості

вуглецю в сталі залежно від фрактальної структури феритно-перлітної структури можливо застосувати для дослідження тренду впливу вуглецю на структуру та оцінювання його впливу на критерії якості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дейнеко Л. Н., Большаков В. И. Термическое упрочнение соединительных деталей магистральных трубопроводов : монография. Днепропетровск : Gaudeamus, 2000. 120 с.
2. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ, 2014. № 5. С. 12–18. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
3. Kroviakov S., Zvoloka M., Dudnik L., 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>
4. Іванцов С. В. Вплив параметрів структури на кінетику руйнування мікролегованих будівельних сталей : дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : 05.02.01. Дніпропетровськ, 2014. 192 с.
5. Ivantsov S. V., Bolshakov V. I., Volkova O. V., Scheller P. R. CCT-diagram of high strength steel X70. *New developments in Geoscience, Geoinforming, Metallurgy and Mining Economics*. 2007. Vol. 58. Pp. 113–121.
6. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: doi: [10.15407/mfint.40.09.1165](https://doi.org/10.15407/mfint.40.09.1165)
7. Uzlov O., Malchere A., Bolshakov V. I., Esnouf C. Investigation of Acicular Ferrite Structure and Properties of C–Mn–Al–Ti–N Steels. *Advanced Materials Research*. 2007. Vol. 23. Pp. 209–312. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.23.209>
8. 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>
9. Бунин К. П., Баранов А. А. Металлография : монография. Москва : Металлургия, 1970. 256 с.
10. 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>
11. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий. *Металлофизика новейшие технологии*. 2017. Т. 39. № 3. С. 949–957. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/130334>
12. Kroviakov S., Volchuk V., Zvoloka M., 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. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>
13. 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://hrcak.srce.hr/202359>
14. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
15. Karuskevych M. V., Zhuravel' I. M., Maslak T. P. Application of fractal geometry to the problems of prediction of the residual service life of aircraft structures. *Materials Science*. 2012. Vol. 47. № 5. Pp. 621–626.
16. Berns H., Theisen W. Ferrous materials: Steel and Cast Iron : monograph. Berlin Heidelberg : Springer, 2008. 418 p.
17. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с. URL: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
18. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении. *Доповіди НАН України*. 2008. № 11. С. 99–107. URL: <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
19. Волчук В. М. Моделирование властивостей конструкційних матеріалів. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 1. С. 21–35. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/201950>
20. 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. URL: <http://uapatents.com/3-51439-sposib-viznachennya-fraktalno-rozmirnosti-zobrazhennya.html>
21. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Основы организации фрактального моделирования : монография. Киев : Академперіодика НАН України, 2017. 170 с.

22. Волчук В. Н. Применение вейвлет-анализа для оценки зеренной структуры металлов. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2009. № 4. С. 24–32. URL : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
23. Волчук В. Н. Применение концепции мультифракталов для контроля качества низколегированной стали. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 3. С. 20–27. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.250918.20.3954>
24. 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 Savvitskiy M. Dnipro : SHEE “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”*; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. Pp. 48–53. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/1380>

REFERENCES

1. Deyneko L.N., Bol'shakov V.I. *Termicheskoye uprochneniye soyedinitel'nykh detaley magistral'nykh truboprovodov* [Thermal hardening of connecting parts of trunk pipelines]. Dnepropetrovsk: Gaudeamus, 2000. 120 p. (in Russian).
2. 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 Prydniprovskoy derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
3. 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.
4. Ivantsov S.V. *Vplyv parametriv struktury na kinetyku ruynuvannya mikrolehovanykh budivel'nykh staley: diss. na zdobut'ya. nauk. stup. kand. tehn. nauk : 05.02.01* [Influence of structure parameters on the kinetics of fracture of microalloyed structural steels: thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (05.02.01 – Materials Science)]. Dnepropetrovsk, 2014, 192 p. (in Ukrainian).
5. Ivantsov S.V., Bolshakov V.I., Volkova O.V. and Scheller P.R. CCT-diagram of high strength steel X70. *New developments in Geoscience, Geoinforming, Metallurgy and Mining Economics*. 2007, vol. 58, pp. 113–121.
6. 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.
7. Uzlov O., Malchere A., Bolshakov V. I. and Esnouf C. Investigation of Acicular Ferrite Structure and Properties of C–Mn–Al–Ti–N Steels. *Advanced Materials Research*. 2007. vol. 23, pp. 209–312.
8. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv CIIKH-43 ta CIIKHΦ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers CIIKH-43 and CIIKHΦ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2019, no. 4, pp. 22–35. (in Ukrainian).
9. Bunin K.P. and Baranov A.A. *Metallografiya* [Metallography]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1970, 256 p. (in Russian).
10. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p.
11. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).
12. 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.
13. 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.
14. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
15. Karuskevych M.V., Zhuravel' I.M. and Maslak T.P. Application of fractal geometry to the problems of prediction of the residual service life of aircraft structures. *Materials Science*. 2012, vol. 47, no. 5, pp. 621–626.
16. Berns H., Theisen W. *Ferrous materials: Steel and Cast Iron*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008, 418 p.
17. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
18. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osobennosti primeneniya mul'tifraktal'nogo formalizma v materialovedenii* [Features of the multifractal formalism in materials]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 11, pp. 99–107. (in Russian).
19. Volchuk V.M. Modeling properties of structural materials. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2020, no. 1, pp. 21–35. (in Ukrainian).

20. 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).

21. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizacii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).

22. Volchuk V.N. *Primeneniye veyvlet-analiza dlya otsenki zerennoy struktury metallov* [The use of wavelet analysis to assess the grain structure of metals]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2009, no. 4, pp. 24–32. (in Russian).

23. Volchuk V.M. *Primeneniye kontseptsii mul'tifraktalov dlya kontrolya kachestva nizkolegirovannoy stali* [Application of the concept of multifractal to control the quality of low-alloy steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 3, pp. 20–27. (in Russian).

24. 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 "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture"; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, pp. 48–53.

Надійшла до редакції: 10.05.2020 р.