

ПОБУДОВА НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ПОВЕРХОНЬ БІЛИХ ЧАВУНІВ

А. О. Журба

Національна металургійна академія України

Анотація. У статті розглядаються поверхні структур білих чавунів, легованих ванадієм та зміна їх фрактальної розмірності в залежності від концентрації ванадію в сплаві. Побудовані емпіричні розподілення локальних фрактальних розмірностей структур. Побудована нечітка модель оцінювання фрактальної розмірності зображень поверхонь білих чавунів.

Ключові слова: білі чавуни, фрактальна розмірність, фрактальні розподілення, метод BoxCounting, нечітка модель.

Вступ

Скейлінгова властивість фрактальних об'єктів забезпечує постійність їх основних геометричних особливостей при зміні масштабу. До об'єктів, які характеризуються фрактальними властивостями, можна віднести і різні металеві структури [1]. У зв'язку з цим становить інтерес дослідження фрактальними методами поведінки структур білих чавунів при зміні вмісту ванадію.

Структури білих чавунів як і більшість природних матеріалів, мають складну фрактальну структуру. У зв'язку з цим актуальною задачею є дослідження таких структур методами фрактального аналізу.

Білий чавун являє собою чавун, в якому весь вуглець хімічно зв'язаний з залізом і міститься у вигляді карбиду Fe_3C (цементиту).

Білий чавун має після тверднення ледебурирно-карбідно-перлітну структуру і не містить видимих під мікроскопом включень графіту. Так як у білому чавуні весь вуглець перебуває у вигляді цементиту, такий чавун у зломі має світлий відтінок.

Білий чавун дуже крихкий та твердий, важко піддається обробці різанням і в практиці застосовується рідко (як правило, використовують для одержання ковкого чавуну).

У промисловості використовуються в основному так звані відбілені чавуни — вилівки з сірого чавуну з шаром білого чавуну у вигляді твердої кірки на поверхні. Із них виливають валки прокатних станів, стрілки трамвайних рейок, бандажі вагонних коліс, кулі різних млинів [2].

Відбілювання на деяку глибину (12...30 мм) отримують шляхом швидкого охолодження поверхні (наприклад, виливанням чавуну в металеві або піщані форми). Для зняття структурних напружень, які можуть призвести до утворення

тріщин, вилівки піддають нагріванню при 500...550 °С. Висока зносостійкість відбілених чавунів обумовлена твердістю поверхні, що досягає 400...500 HV.

Для збільшення зносостійкості білі чавуни легують хромом, ванадієм, молібденом та іншими карбідоутворюючими елементами [3].

Тому в роботі представлено дослідження фрактальних властивостей структури білих чавунів, легованих ванадієм.

Метою даної роботи є аналіз фрактальних характеристик поверхонь металоструктур білих чавунів з різним змістом ванадію і вуглецю та побудова нечіткої моделі оцінювання їх фрактальної розмірності.

1. Матеріали дослідження

В процесі дослідження аналізувалися структури білих чавунів, легованих ванадієм. Фотографії демонструють вплив концентрації ванадію в сплаві на структуру чавуну.

Мікроструктури виявляли шляхом різних видів теплового травлення. При тепловому травленні полірований зразок поміщають в камеру електропечі МП-24, яка розігріта до 540°С. При цьому поверхня зразка окислюється, і колір її змінюється. При появі темно синього кольору на полірованій поверхні зразок виймають і охолоджують на масивній металевій плиті.

Теплове травлення дозволяє розрізнити фазові складові за кольором: продукти розпаду аустеніту мають синій колір (на чорно-білої фотографії темно сірий або чорний, то є самий темний), карбід ванадію забарвлюється в жовтий (на чорно-білої фотографії білий), цементит - в цегляно-червоний. (на чорно-білої фотографії цей колір виглядає сірим, тобто проміжним).

Структура білого чавуну без добавок ванадію (рис. 1) складається з ледебурига і продуктів розпаду аустеніту, тобто без карбідів ванадію, які виглядають яскраво білими на фотографіях.

Що більше ванадію, тим більше карбідів ванадію (яскраво білого кольору) в структурі чавуну.

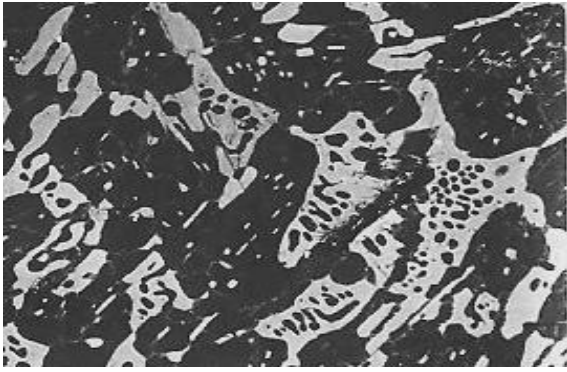
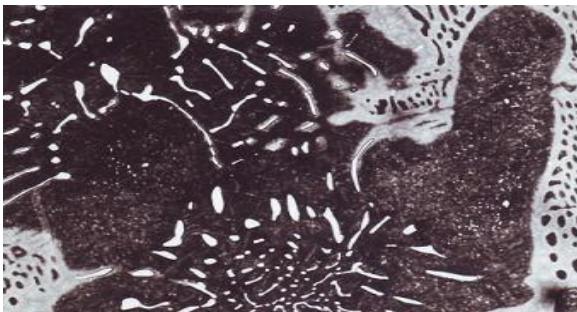


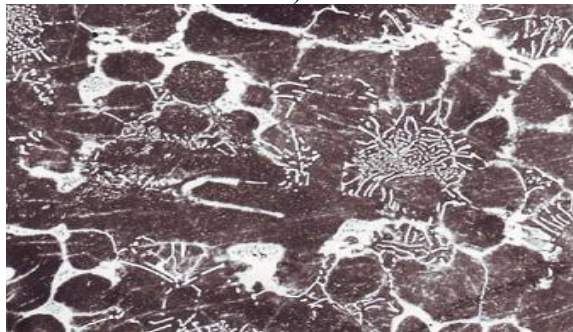
Рис. 1. Структура білого чавуну без добавок ванадію

Ледебурит це евтектичні колонії, які являють собою пророслі один в одному кристали евтектичних цементиту і аустеніту. Цементит виглядає сірим, а аустеніт при кімнатній температурі являє продукти розпаду, які виглядають чорними. Тобто ледебурит на фотографії виглядає сірими ділянками в темних точках.

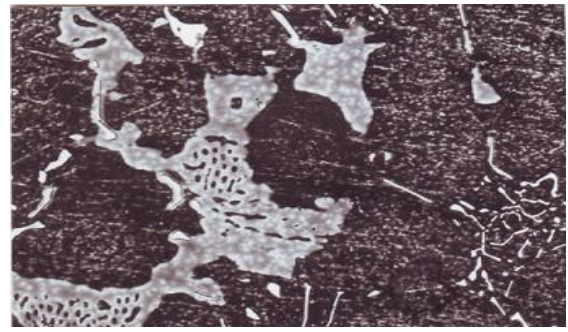
На рис. 2 представлені фотографії мікроструктур чавунів з різним вмістом ванадію, а вміст вуглецю можна вважати \approx однаковим. Причому, на рис. 2а, 2в, 2д, 2ж - чавунні зразки при кристалізації охолоджували повільно (60 град / хв), а на рис. 2б, 2г, 2є - охолоджували з більшою швидкістю (400 град / хв).



а)



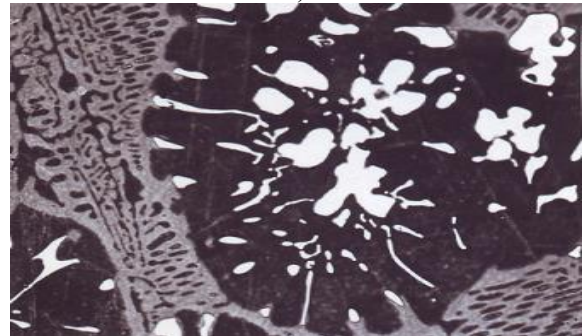
б)



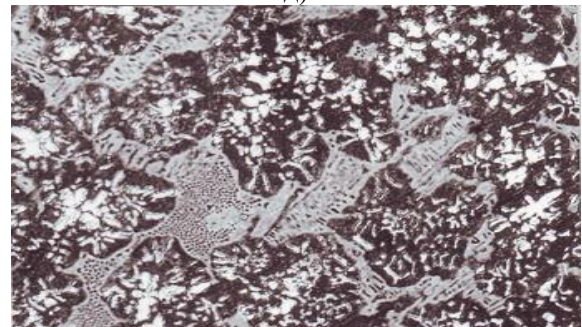
в)



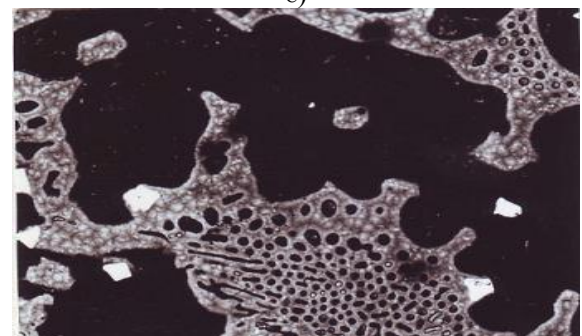
г)



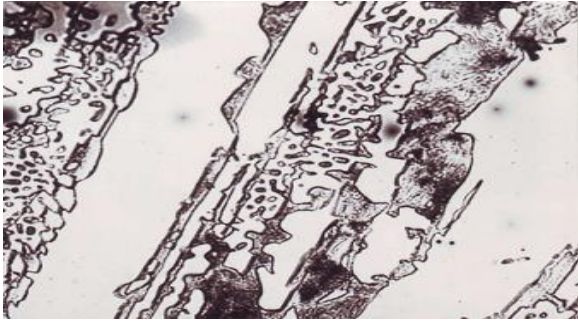
д)



е)



ж)



з)

Рис. 2. Мікроструктура литих Fe-C-V сплавів. Швидкість охолодження при кристалізації а, в, д, ж, з – 60 град/мин, б, г, е – 400 град/мин.

X500. Теплове травлення:

а), б) – 3,38% С; 3,02% V

в), г) – 3,35% С; 4,52% V

д), е) – 3,72% С; 8,0% V

ж) – 3,70% С; 2,02% V

з) – 4,68% С; 2,00% V

Структура сплавів при прискореному охолодженні має менші параметри (подрібнюється), порівняно зі структурою сплавів, що охолоджують при кристалізації повільніше.

Темна складова (чорний фон) - продукти розпаду аустеніту;

Біла складова - карбіди ванадію.

Ділянки сірого кольору - це цементит евтектичний. Ці ділянки як би пронизані чорними гілками (продуктами розпаду евтектичного аустеніту), а разом вони утворюють структурні агрегати, які називаються евтектичними колоніями, які в свою чергу називаються ледебуріти.

2. Методики дослідження

Для обчислення фрактальної розмірності зображень білих чавунів було обрано метод класичного BOX COUNTING, оскільки він може бути застосований до зображень будь-якої структури та дозволяє визначити фрактальну розмірність не строго самоподібних об'єктів [4]. Для оцінки box-розмірності, евклідов простір, що містить зображення об'єкта, розділяють сіткою з коміркою розміру r та підраховують непусті, зайняті об'єктом, що досліджується, квадрати $N(r)$. Далі розмір r зменшують і знову підраховують кількість непустих полів $N(r)$. Нахил графіку у логарифмічному масштабі $N(r)$ від r відповідає величині розмірності [5].

При фрактальному аналізі зображень розрізняють глобальну та локальні фрактальні розмірності. Під глобальною фрактальною розмірністю мають на увазі розмірність всього зображення, а за локальні фрактальні розмірності приймають розмірності різних фрагментів зображення [4].

Як правило, значення глобальної та локальних фрактальних розмірностей суттєво відрізняються.

Сильна залежність величини фрактальної розмірності від фрагменту зображення перешкоджає об'єктивній оцінці розмірності. Але саме цей факт свідчить про можливість анізотропії даної поверхні.

Для вирішення цієї проблеми необхідно розділити зображення на малі фрагменти і в цих фрагментах оцінювати локальні фрактальні розмірності. Якщо фрагменти знаходяться на зображенні фрактала, що має однакову розмірність, то і загальна оцінка розмірності по цих фрагментах залишиться незмінною.

При визначенні локальної розмірності виникає питання про розмір фрагментів зображення. Очевидно, що цей розмір повинен бути не більше, ніж передбачувані розміри аналізованих елементів зображення. Але якщо розмір фрагмента вибрати близьким розміру досліджуваного елемента, то можливий випадок, при якому тільки частина елемента опиниться в межах одного фрагмента, а інша частина опиниться в межах іншого фрагмента. Це призведе до спотворення оцінки розмірності, оскільки окрім фрактального зображення до області аналізу потрапить і фон, розмірність якого інша. Тому необхідно вибирати розміри фрагментів або вікон свідомо малими, близькими до розмірів мінімальних елементів очікуваного фрактального рисунку.

Якщо зображення складається з декількох складових, частина з яких при масштабі більшому деякого числа, стає точками, інші ж частини на цьому масштабі залишаються множинами, то при визначенні фрактальної розмірності виникають труднощі. Якщо ігнорувати масштаби при оцінці глобальної фрактальної розмірності такого зображення, то обчислена фрактальна розмірність може бути некоректною, спотвореною, оскільки частина ділянок зображення виявиться непроаналізованою [4].

Тому для визначення локальних розмірностей використовується **метод ковзаючого вікна**, який полягає у визначенні фрактальної розмірності в межах вікна, розмір якого можна задавати довільно. Вікно попіксельно переміщується по зображенню. При цьому на кожному кроці обчислюється фрактальна розмірність зображення, що потрапило у ковзаюче вікно. Розмір вікна залежить від масштабу δ і розраховується із співвідношення $2\delta+1$ [5]. Після отримання локальних фрактальних розмірностей проводиться побудова їх емпіричного розподілу ймовірностей $W(D)/W_{\max}(D)$ [6]. Проведені дослідження

показали [6], що розмір ковзаючого вікна повинен задовольняти виразу $2^N - 1$, що відповідає масштабу $\delta = 1, 3, 7, 15$ і т.д. Тому для побудови фрактальних розподілень зображень у роботі було обрано масштаб $\delta = 7$ з розміром ковзаючого вікна 15×15 пікселів.

У околиці значення фрактальної розмірності корисної складової завжди присутній «важкий хвіст» фрактального розподілу (паретіана), що досягає стабільної величини 10-20% [6].

Складні зображення або зображення, що складаються з безлічі фрагментів різної природи, після обчислення локальних розмірностей дають багатомодальні розподіли. Кожна мода такого розподілу відповідає кластеру зображення, що має близькі значення локальних розмірностей.

Емпіричний розподіл локальних фрактальних розмірностей залежить від параметрів вимірюючого алгоритму, а саме від розмірів масштабного та вимірюючого вікон. Правильний підбір параметрів дозволяє вирішувати такі задачі як виділення всіх елементів фрактала, виділення всього фрактала із зображення, виділення контурів елементів фрактала [5].

Побудова нечіткої моделі оцінювання фрактальної розмірності проводилася з використанням Fuzzy logic toolbox - вбудованої в Matlab сукупності функцій, що містить набір засобів, які дозволяють створювати і редагувати нечіткі системи всередині середовища Matlab; вбудовувати нечітку підсистему в SimuLink (поставляється з Matlab) при моделюванні загальної системи; побудувати нечітку систему в Matlab у вигляді процедури, що викликається з програми, яка написана на мові Сі.

Усі дії над нечіткими числами задаються мінімальним набором функцій і відбуваються всередині програми. Таким чином, користувачу достатньо лише визначити усі вхідні і вихідні змінні і задати таблицю правил, а решту роботи робить Matlab. Дефазифікація виконується в один з п'ятих методів, зазначених програмістом.

Для реалізації системи вводу-виводу в нечіткому контролері при оцінюванні фрактальної розмірності білих чавунів використовувався нечіткий алгоритм Мамдані.

3. Результати дослідження

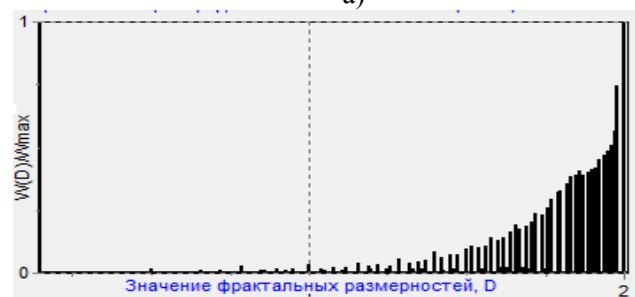
В ході дослідження було проаналізовано кожне із зображень, представлених на рис. 2: визначалася фрактальна розмірність зображень методом Box Counting та побудовані фрактальні розподілення методом ковзаючого вікна. В табл. 1 представлені значення фрактальної розмірності зображень поверхонь білих чавунів.

Таблиця 1
Фрактальна розмірність зображень білих чавунів

Назва рисунку	Значення фрактальної розмірності
Рисунок 2а	1,5993
Рисунок 2б	1,6669
Рисунок 2в	1,6552
Рисунок 2г	1,6848
Рисунок 2д	1,6568
Рисунок 2е	1,7583
Рисунок 2 ж	1,6431
Рисунок 2з	1,8211

З табл.1 видно, що значення фрактальної розмірності для зображень білих чавунів змінюється в діапазоні від 1,5993 до 1,8211. При цьому для зразків, швидкість охолодження яких при кристалізації дорівнює 60 град/мин, фрактальна розмірність змінюється від 1,5993 до 1,6568, а для зразків, швидкість охолодження яких при кристалізації 400 град/мин, фрактальна розмірність змінюється від 1,669 до 1,8211. З цього можна зробити висновок, що при збільшенні швидкості охолодження, збільшуються значення фрактальної розмірності зразків білих чавунів.

На рис. 3 представлені фрактальні розподілення для зображень поверхонь білих чавунів, що представлені на рис. 2.



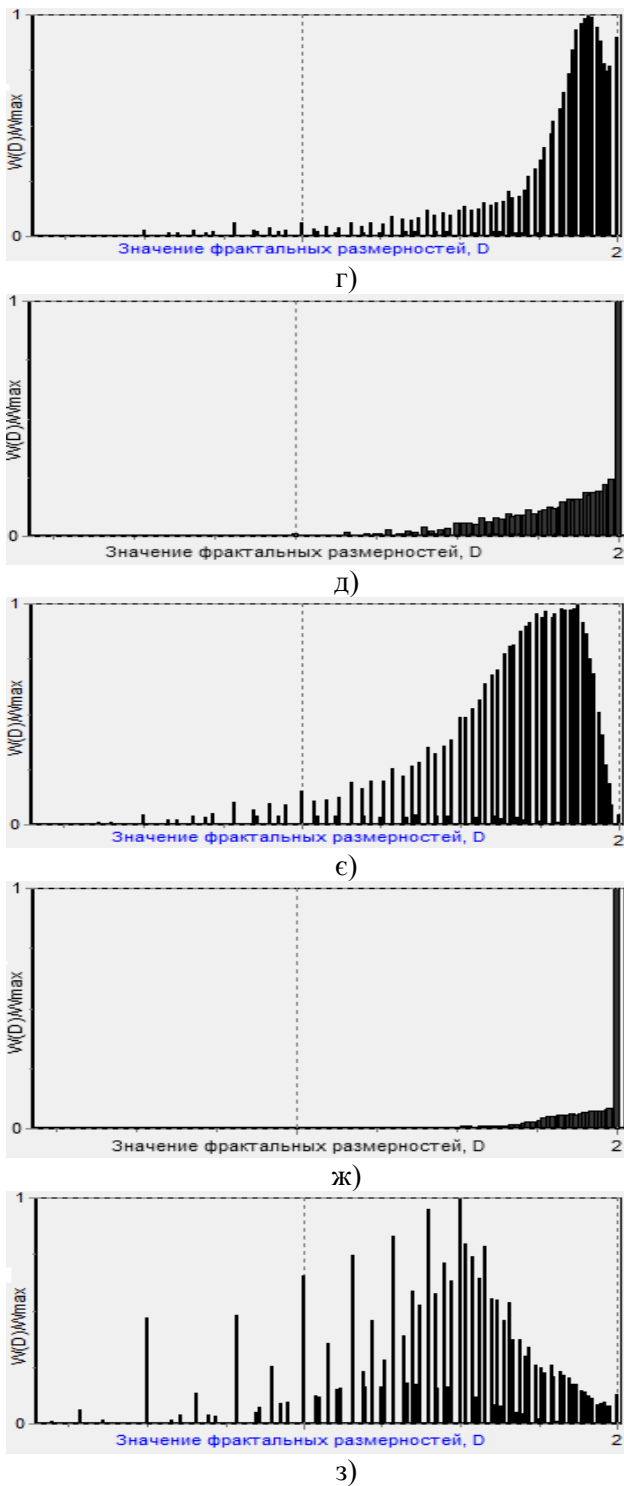


Рис. 3. Фрактальні розподілення поверхонь білих чавунів, зображення яких представлено на рис.2

З рис. 3 видно, що для чавунів, швидкість охолодження при кристалізації яких більш повільна, фрактальні розподілення мають однорідний характер. Для чавунів з швидкістю охолодження 400 град/хв. фрактальні розподілення мають многомодальний характер. Такі результати говорять про зміну властивостей матеріалу від швидкості охолодження, причому менша швидкість покращує властивості матеріалу (про це говорить

однорідний характер розподілень). Якщо порівнювати між собою результати розподілень для чавунів отриманих з більшою швидкістю охолодження, но з різним вмістом ванадію, видно, що найбільшу кількість мод розподілення має структура з вмістом ванадію 2,02%. Це говорить про найгірші властивості даного матеріалу з наведених. Тобто, при збільшенні вмісту ванадію, властивість матеріалу покращується.

При побудові нечіткої системи оцінювання фрактальної розмірності зображень поверхонь білих чавунів вхідні дані визначаються наступними вхідними лінгвістичними змінними (ЛЗ), такими як:

1. Вміст Калію (рис. 4);
2. Вміст Ванадію (рис. 5);
3. Час охолодження (рис. 6).

У якості вихідної лінгвістичної змінної використовується ЛЗ «Фрактальна розмірність» (рис. 7).

Для рішення задачі фаззифікації пропонуються трикутні та параболічні функції приналежності, оскільки вхідні величини можуть ставитися до декількох оцінок, з різним ступенем упевненості.

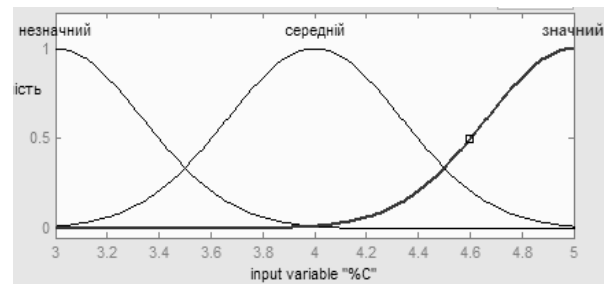


Рис. 4. Функція приналежності вхідної ЛЗ «Вміст Калію»

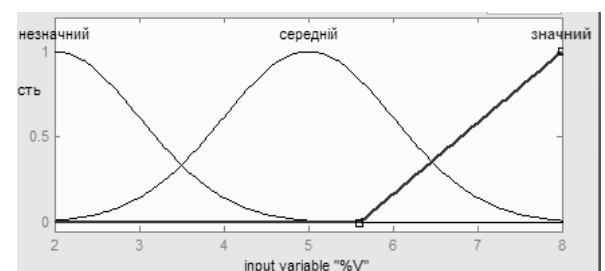


Рис. 5. Функція приналежності вхідної ЛЗ «Вміст Ванадію»

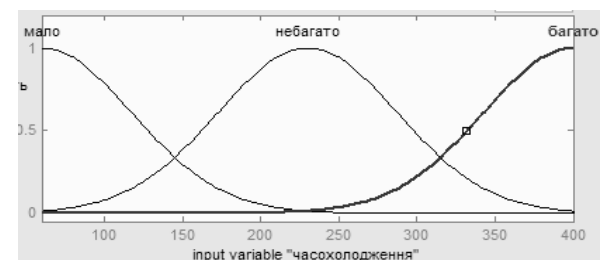


Рис. 6. Функція приналежності вхідної ЛЗ «Час охолодження»

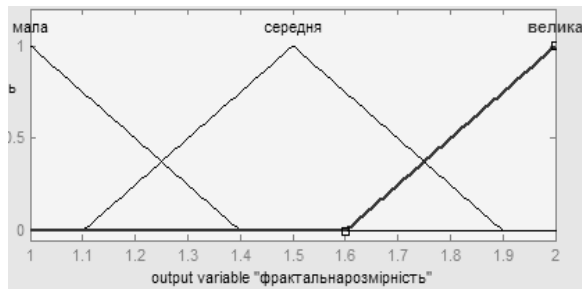


Рис. 7. Функція приналежності для термів ЛЗ «Фрактальна розмірність»

У табл. 2 наведено порівняльний аналіз розрахованих значень фрактальної розмірності і даних, що спрогнозовано з використанням розробленої нечіткої моделі.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз розрахованих і спрогнозованих значень фрактальної розмірності

Рисунок	Фрактальна розмірність		Відносна похибка, %
	Передбачена	Розрахована	
2а	1.4525	1.5993	9.17
2б	1.5611	1.6552	5.68
2в	1.7360	1.6568	4.78
2г	1.5852	1.6431	3.52
2д	1.7801	1.6669	6.79
2е	1.5922	1.6848	5.49
2ж	1.6997	1.7583	3.33
2з	1.8873	1.8211	3.63

З результатів, що наведені у табл.2 видно, що відносна похибка змінюється у діапазоні від 3% до 9%, що говорить про роботоспособність розробленої нечіткої моделі.

Висновки

За допомогою фрактальних методів обробки зображень проаналізовано зображення поверхонь білих чавунів з різним вмістом ванадію. Обчислені фрактальні розмірності зображень білих чавунів з використанням класичного методу Box Counting, проведено порівняльний аналіз результатів для матеріалів з різним вмістом ванадію. Побудовані емпіричні розподілення локальних фрактальних розподілень. Побудовано нечітку модель оцінювання фрактальної розмірності з використанням Fuzzy logic toolbox.

При цьому встановлено, що для зразків, отриманих з різною швидкістю охолодження, діапазони значень фрактальної розмірності різні.

Емпіричний розподіл фрактальної розмірності показав одномірний характер розподілу для зразків зі швидкістю охолодження 60 град./хв. і многомодальний характер розподілу при швидкості охолодження 400 град./хв. При чому кількість мод розподілення відрізняється для зразків з різним вмістом ванадію.

Нечітка модель оцінювання фрактальної розмірності має відносну похибку 3-9%.

Список використаної літератури

1. Хільчевський, В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів [Текст] : Навчальний посібник. К.: Либідь, 2002. — 328с.
2. Лахтин, Ю. М. Основы металловедения [Текст]. — М.: Металлургия, 1988. — 320с.
3. Мовчан, В. П. Основы металлургии [Текст] / В. П. Мовчан, М. М. Бережний // Дніпропетровськ: Пороги. 2001. 336 с.
4. Потапов, А. А. Новейшие методы обработки изображений [Текст] / А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, А. А. Пахомов, В. А. Потапова. Под ред. А. А. Потапова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 496 с.
5. Журба, А. А. Анализ фрактальных характеристик поверхностей стали в процессе формирования композитной структуры [Текст] / А. А. Журба, А. И. Михалев, С. И. Губенко // Сучасні проблеми металлургії. — № 14. Дніпропетровськ. - 2011. — С. 93–99.
6. Журба, А. О. Фрактальні характеристики зображень металоструктур та особливості їх обчислення [Текст] / А. О. Журба, О. І. Михальов // Системные технологии моделирования сложных систем / Монография под общей редакцией проф. А.И. Михалева. — Днепр: НМетАУ-ИВК "Системные технологии", 2016. — С. 299–327.

References

1. Khilchevsky, V. V. (2002). Materials science and technology of construction materials: Textbook [Materialozhnavstvo i tehnologiya konstrukciinuh materialiv]. Kyiv: Lybid, 328 p.
2. Lakhtin, Yu. M. (1988). Fundamentals of Metallography [Osnovu metallovedeniya]. Moscow: Metallurgy, 320 p.
3. Movchan, V. P. , Berezhnaya M. N. (2001). Fundamentals of Metallurgy [Osnovu metallurgii]. Dnepropetrovsk: Thresholds, 336 p.
4. Potapov, A. A. , Guliaev, Yu. V. , Nikitov, S. A. , Pakhomov, A. A. , Potapova, V. A. (2008). The newest methods of processing images [Noveish-

ie metodu obrabotki izobrazinii]. Ed. A. A. Potapov. Moscow: FIZMATLIT, 496 p.

5. Zhurba, A. A. , Mikhalev, A. I. , Gubenko, S. I. (2011). Analysis of the fractal characteristics of steel surfaces during the formation of a composite structure [Analiz fraktalnih karakteristik poverhnostej stali v processe formirovaniya kompozitnoj strukturu]. Dnipropetrovsk: Modern problems of metallurgy № 14, p. 93–99.

6. Zhurba, A. O., Mikhalev, O. I. (2016). Fractal characteristics of the structure of metal structures, that particular appendage [Fraktalni karakteristiki zobrajen metalostruktur ta osoblivosti ih obchuslen]. Dnepr: System technologies for modeling complex systems. Monograph under the general editorship of prof. A. I. Mikhalev, NMetAU-IVK "System technologies", pp. 299–327.

FUZZY MODEL FOR EVALUATION FRACTAL DIMENSION OF WHITE IRON IMAGING

A. O. Zhurba

National Metallurgical Academy of Ukraine

Annotation. The article deals with the surfaces of the structures of white cast iron doped with vanadium and the change in their fractal dimension, depending on the concentration of vanadium in the alloy. Empirical distributions of local fractal dimensions of structures are constructed. A fuzzy model for estimating the fractal dimension of images of white cast iron surfaces is constructed.

With the help of fractal image processing methods, images of the surfaces of white cast iron with different vanadium contents are analyzed. The fractal dimensions of the images of white cast iron using the classical Box Counting method are calculated, and the results for materials with different vanadium contents are compared. Empirical distributions of local fractal distributions are constructed. A fuzzy model for estimating the fractal dimension is constructed using the Fuzzy logic toolbox.

Key words: white cast iron, fractal dimension, fractal distributions, BoxCounting method, fuzzy model.

ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

А. А. Журба

Национальная металлургическая академия Украины

Аннотация. В статье рассматриваются поверхности структур белых чугунов, легированных ванадием и изменение их фрактальной размерности в зависимости от концентрации ванадия в сплаве. Построены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей структур. Построена нечеткая модель оценки фрактальной размерности изображений поверхностей белых чугунов.

Ключевые слова: белые чугуны, фрактальная размерность, фрактальные распределения, метод BoxCounting, нечеткая модель.

Получено 18.04.2017



Журба Анна Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України. Пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600, Україна. E-mail: annette.zhurba@ gmail.com. Тел. (067) 3150172.

Zhurba Anna, candidate of technical science, assistant professor, assistant professor of the Department of Information Technologies and Systems. National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-4367-385X