

І.В. Красіков, І.Є. Красікова, В.В. Картузов

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ

ВПЛИВ РОЗМИТТЯ ЗОБРАЖЕННЯ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛУ НА ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В роботі розглянуто вплив якості зображень (наявність гаусового розмиття) структури матеріалу на обчислювані за зображенням фрактальні характеристики та питому поверхню системи границь. Показано, що вплив гаусового розмиття на мультифрактальні характеристики структури суто менший, ніж на мультифрактальні характеристики системи виділених границь та її питому поверхню. Зроблено висновок щодо того, що мультифрактальний аналіз зображень системи виділених границь є важливою характеристикою, що доповнює інші характеристики структури матеріалу, та кількісно характеризує розвиненість системи границь.

Ключові слова: мультифрактальність, електронна мікроскопія, оброблення зображень, гаусове розмиття, питома поверхня, границі зерен

I.V. Krasikov, I.E. Krasikova, V.V. Kartuzov

THE EFFECT OF IMAGE BLURRING ON THE DETERMINATION OF ITS MULTIFRACTAL CHARACTERISTICS IN MATERIAL STRUCTURES

The paper examines the influence of image quality (presence of Gaussian blurring) on the computed fractal characteristics and specific surface area of the material structure. It is demonstrated that the impact of Gaussian blurring on the multifractal characteristics of the structure is relatively smaller compared to its impact on the multifractal characteristics of the extracted boundaries system and its specific surface area. A conclusion is drawn that the multifractal analysis of the extracted boundaries system is an important characteristic that complements other characteristics of the material structure and quantitatively characterizes the development of the boundary system.

Keywords: multifractality, electron microscopy, image processing, Gaussian blurring, specific surface area, grain boundaries

Постановка проблеми

При вивченні мультифрактальних характеристик структури нових матеріалів, що розробляються, використовуються зображення зразків, одержані за допомогою різних методів — оптичної або електронної мікроскопії, оцифрування наявних зображень і т.і. Проблеми якості отримуваних зображень, зокрема, сучасними методами електронної мікроскопії, є одним з нагальних питань сучасного матеріалознавства [1]. Методи обробки зображень та фрактальний аналіз стали повсякденними інструментами при роботі з матеріалами самого різного походження та призначення [2,3]. Вочевидь, що в процесі обробки зображень при обчисленні мультифрактальних характеристик якості вихідних зображень значно впливає на значення, які обчислюються. У контексті цієї статті говориться про якість зображення з технічної точки зору — розмиття зображення (наприклад, через розфокусування об'єктиву), неоднорідність таких характеристик, як яскравість чи контрастність, по площі зображення тощо. Наразі розглядаємо єдиний, але, ймовірно, найважливіший аспект якості зображення — його розмиття.

Раніше, в [4], було розглянуто стійкість результатів обчислення мультифрактальних характеристик програмним комплексом Fraculator [5] по відношенню до можливих спотворень і артефактів вихідних зображень структури. Це дослідження було пов'язано з доведеною нами нестійкістю програмного забезпечення, що використовувалося раніше, зокрема, найбільш поширеного програмного комплексу MFRDrom, який було розроблено групою дослідників під керівництвом Г. Встовського [6]. Доведена стійкість програми Fraculator дозволяє перейти до розгляду впливу на мультифрактальні характеристики ступеня розмиття вихідних зображень.

Дослідження впливу розмиття зображення на визначення мультифрактальних характеристик

Для вивчення впливу розмиття вихідного зображення на обчислювані програмою мультифрактальні характеристики були взяті насамперед модельний класичний фрактал — килим Серпінського (рис. 1), а також три різні матеріалознавчі структури, які наведено на рис. 2. Розміри всіх зображень однакові, 660×496 пікселів.

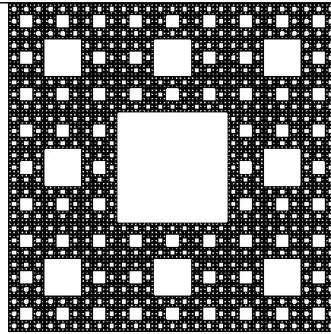


Рис. 1. Модельний фрактал — килим Серпінського

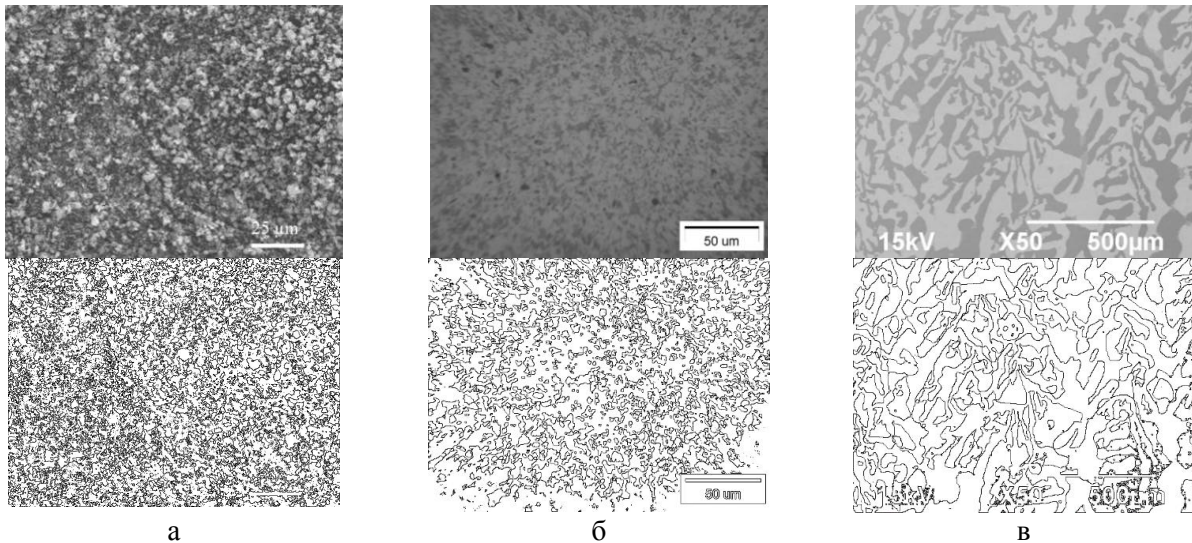


Рис. 2. Вихідні зображення структур та виділених систем границь для вивчення впливу розмиття зображень на мультифрактальні характеристики, що обчислюються

Основна відмінність наведених структур одна від одної полягає в різних характеристичних розмірах їх структурних елементів — від мінімального (дрібнозерниста структура) до максимального (крупнозерниста структура), а також якісно різних систем границь (від дуже розвиненої до невеликої кількості гладких границь).

Моделювання розмиття полягало у застосуванні до вихідного зображення гаусового розмиття [7] з контрольованим рівнем (що задається в пікселях), при якому для кожного пікселя зображення його нове RGB-значення обчислювалося як сума зважених RGB-значень сусідніх пікселів в діапазоні відстаней 3σ , де σ — вищезгаданий рівень розмиття (усі одиниці відстаней тут і далі виражено в пікселях).

$$I(x, y) = \sum_{d_x=-3\sigma}^{3\sigma} \sum_{d_y=-3\sigma}^{3\sigma} I(x + d_x, y + d_y) e^{-\frac{d_x^2 + d_y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Приклади вихідних зображень при рівні розмиття 2,5 пікселів показано на рис. 3.

Зазвичай дана процедура використовується в комп'ютерній обробці зображень навмисно, для зниження деталізації (наприклад, в алгоритмах комп'ютерного зору для поліпшення чіткості зображення в різних масштабах). Візуальний ефект цього способу розмиття нагадує ефект відтворення зображення через напівпрозорий екран. Однак саме цей вплив на зображення — зниження його деталізації — відіграє негативну роль при визначенні структурних характеристик матеріалів. У даній роботі застосування гаусового розмиття імітує елементи розфокусування об'єктива при отриманні зображення структури матеріалу.

При згадці “зображення структури матеріалу” для дослідників у сфері матеріалознавства однією з найважливіших властивостей є його масштаб, тобто реальні фізичні розміри структурних елементів зображення. Однак при обробці цифрових зображень та обчисленні структурних характеристик, таких як фрактальна розмірність, абсолютне значення масштабу вступає в гру лише на другому етапі характеризації структури.

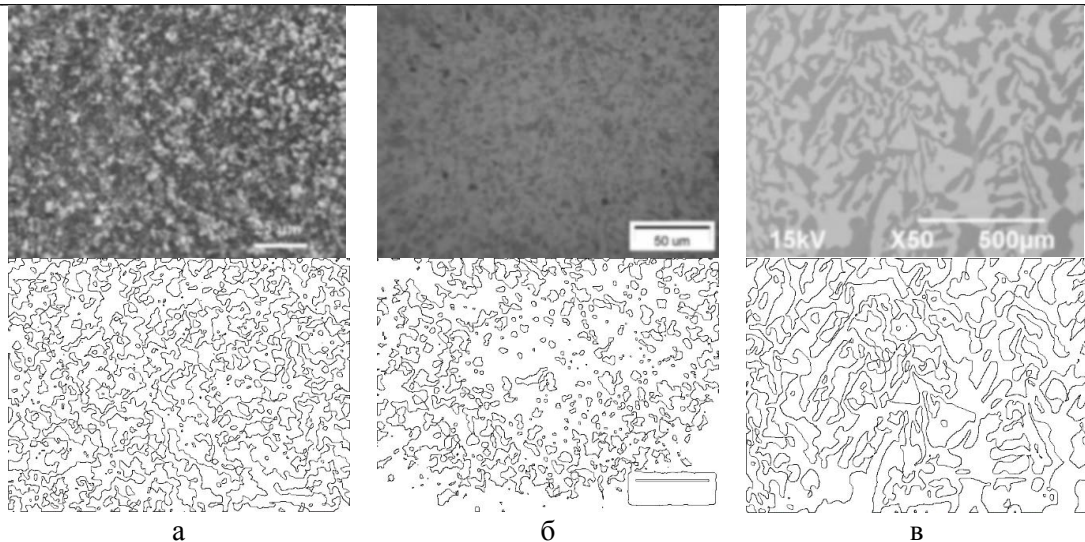


Рис. 3. Зображення структурних елементів вихідних зображень та системи їх границь після застосування гаусового розмиття в 2,5 пікселів

На першому етапі (оцифрування та комп'ютерної обробки оцифрованого зображення) слід пам'ятати, що з точки зору математики зображення являє собою не що інше, як множину геометричних точок, а з точки зору комп'ютерної програми — множину представлень цих точок у пам'яті комп'ютера як множину пікселів (мінімально виділених елементів зображення). Тому, незважаючи на те, що на зображеннях, які розглядаються у роботі, вказано масштаб, його роль суто ілюстративна; інформативним є лише характеристичний розмір структури в пікселях. Більше того, при розгляді системи виділених границь характеристичний розмір структури і характеристичний розмір її границь можуть відрізнятися на порядки, оскільки основний внесок у фрактальність зображень структури роблять саме дрібні деталі, “нерівності” цих границь.

У загальному випадку при характеризації структури матеріалу слід говорити не лише про звичні геометричні параметри структури — зерна, включення, фази тощо — але й про характеристичні розміри та параметри границь цих структур. Поки що у публікаціях, на жаль, це трапляється не часто — зазвичай виконується якісний аналіз границь структури (гладкі, розвинені та інші визначення), і лише в деяких роботах зустрічається кількісна оцінка значень питомої поверхні розподілу включень [10]. Однак така характеристика границь, як питома поверхня, не дає кількісної характеристикації форми границь. Так, збільшення питомої поверхні може бути пов'язано як зі зменшенням розміру часток з гладкою поверхнею, так і з більш порізними, розвиненими границями. Отже, однієї питомої поверхні замало, щоб характеризувати розвиненість границь, і саме тому *мультифрактальний аналіз зображень системи виділених границь спрямований на отримання більш повної кількісної її оцінки, яку неможливо отримати іншими, більш традиційними методами.*

Після внесення (згідно з прийнятим планом обчислювального експерименту) спотворень програмою Fraculator визначалися значення мультифрактальних розмірностей зображень D_0 і D_1 , як найбільш інформативних [8,9], а також — для системи границь — обчислення її питомої поверхні за Салтиковим [10]. Під питомою поверхнею системи границь мається на увазі питома поверхня розділу фаз, зерен тощо, але оскільки з алгоритмічної точки зору нам невідомо, що саме зображено, то надалі ми будемо казати просто про питому поверхню системи виділених границь. Як уже зазначалося, характерною одиницею розміру при комп'ютерній обробці цифрових зображень є піксель, отож, розмірність питомої поверхні при обчисленні її програмою визначається в зворотних пікселях (px^{-1}). Визначення мультифрактальних розмірностей та питомої поверхні проводилося при однакових стандартних налаштуваннях програми, як для самих структур, так і для систем виділених границь.

Розглянемо спочатку вплив гаусового розмиття на модельний об'єкт — килим Серпінського (рис. 1), результати для якого показані на рис. 4.

Як бачимо, вплив гаусового розмиття на фрактальну розмірність структури килима Серпінського в широкому діапазоні рівнів розмиття відсутній, тоді як вплив на фрактальну розмірність системи границь дуже великий — при рівні розмиття в один піксель спостерігається дуже сильне падіння

фрактальної розмірності (фактично на 45%. Питання про застосування такого показника, як відсоткова зміна фрактальної розмірності, який має обмежений діапазон значень, залишається відкритим, однак оскільки в науці про фрактали немає якогось загальноприйнятого показника відношення значень розмірності, у даній статті використовується цей показник, однак слід пам'ятати про його лише ілюстративний характер). Ще більше розмиття впливає на питому поверхню системи границь — вона знижується на 86%. Це пов'язано з тим, що при такому рівні розмиття границі мінімальних елементів килима Серпінського (що мають розмір в один піксель) фактично зникають. При більшій мірі розмиття фрактальність границь практично зникає, і вони перетворюються на невелику кількість гладких ліній (збільшені фрагменти оригінальної системи границь та системи границь при рівні розмиття 10 пікселів показано на рис. 5).

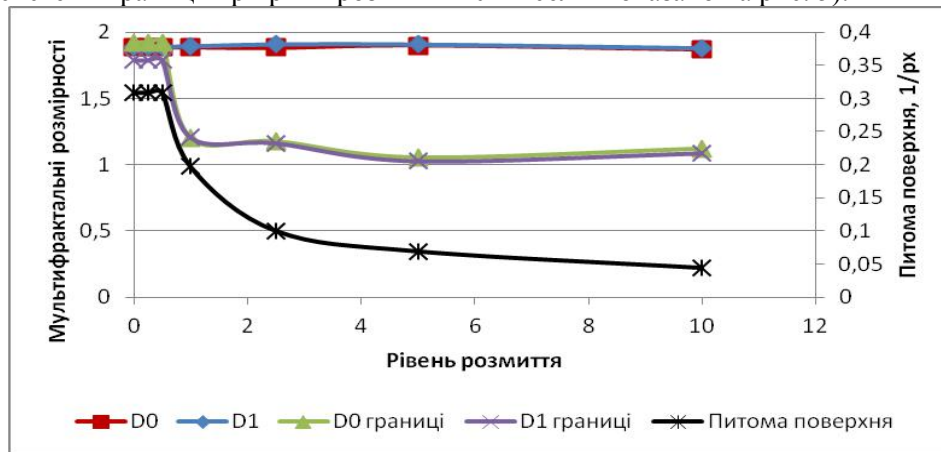


Рис. 4. Вплив гаусового розмиття на мультифрактальні розмірності та питому поверхню системи границь килима Серпінського

Вочевидь, що при сильному розмитті відбувається повна втрата інформації про тонку фрактальну структуру, і система границь по суті перетворюється на систему одновимірних ліній.

Природно, що для реальних об'єктів картина виглядатиме глобально схоже, але конкретні залежності фрактальних характеристик від рівня розмиття будуть різні для різних структур. А ргіогі така залежність буде меншою для крупнозернистої структури з гладкими границями.

Розглянемо конкретні результати обчислень для наведених на рис. 2 структур фрактальних розмірностей (рис. 6) та питомої поверхні системи границь (рис. 7).

З отриманих результатів бачимо, що апіорний висновок повністю виправдався. Вплив розмиття на фрактальні характеристики реальних тестових структур у цілому має місце, але виявляється на рівні, що не перевищує навіть для сильного рівня розмиття (10 пікселів) 8%.

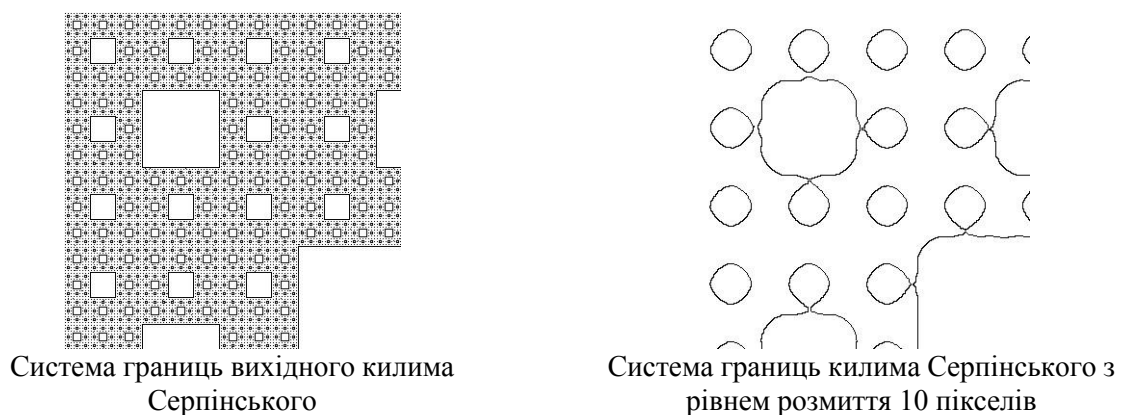


Рис. 5. Вплив гаусового розмиття на структуру границь килима Серпінського

Водночас вплив розмиття на фрактальні характеристики системи границь істотно більший, і становить від 25% від вихідної фрактальної розмірності для дрібнозернистої структури з порізаними границями, до 12% для крупнозернистої структури з гладкими границями. Щодо впливу на питому поверхню системи границь, то він підпорядковується тим самим

закономірностям і становить від 87% для дрібнозернистої структури з порізаними границями до 68% для крупнозернистої структури з гладкими границями.

Як згадувалося вище, такий вплив розмитості на обчислювані характеристики пояснюється тим, що розмиття призводить до зниження деталізації зображення, але при цьому загальне співвідношення кількості чорних і білих пікселів виявляється майже незмінним. Зниження деталізації системи границь призводить до їх згладжування, а отже, і до значно меншого рівня фрактальності, а також до меншої питомої поверхні. Згладжування границь робить їх більш схожими зі стандартними одномірними лініями, тобто розмиття зображення структури веде до отримання нижчих значень мультифрактальних розмірностей для системи виділених границь (що ми бачимо на представлених на рис. 4 та 6 графіках).

Слід також відзначити, що при тому самому рівні розмиття вплив останнього виявляється більшим для дрібнозернистих структур, тому що в цьому випадку звивистість границь має менші характерні розміри, отже, при тому самому рівні розмиття втрата інформації про точні границі настає раніше для структур із меншим характерним розміром. Це твердження підтверджують результати, показані на рис. 6, де верхній графік відповідає найбільш дрібнозернистій структурі, а нижній — структурі з найбільшим значенням характеристичного розміру. Крім того, для дрібнозернистих структур, як і для структур з погано вираженою відмінністю яскравості матриці та включень (з низькою контрастністю), може спостерігатися втрата інформації про границі як такі, оскільки сильний ступінь розмиття призводить до зниження відмінності в яскравості пікселів (через їх перемішування відповідно до (1)).

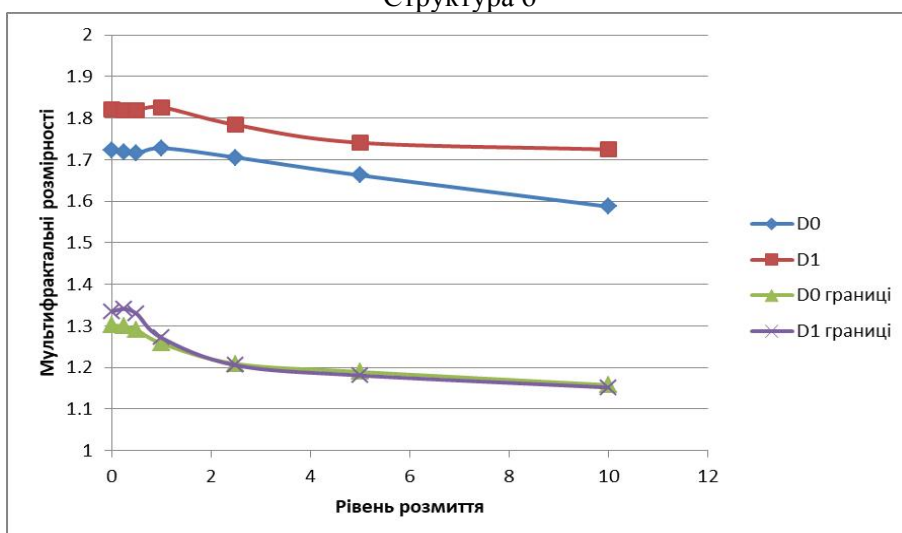
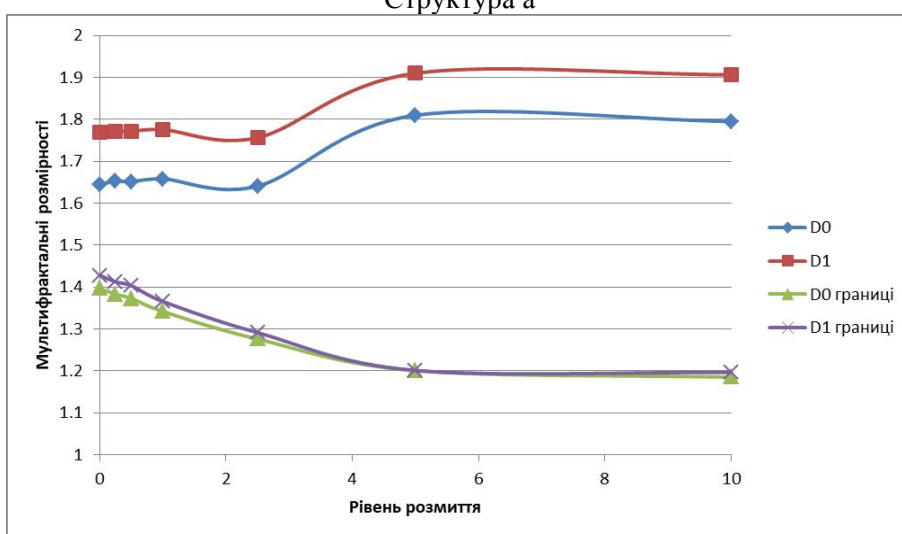
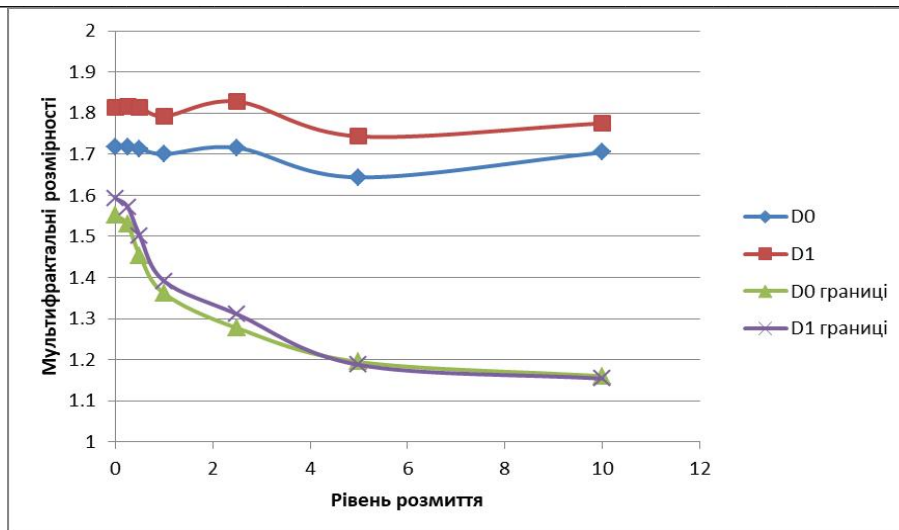
Говорячи про характеристичний розмір і дрібно/крупнозернистість структури, слід розуміти, що в даному випадку, при розгляді зображень структури матеріалу, йдеться не про абсолютні характеристики фізичних структур, а про їх відносний розмір на зображенні. Те, що дослідник-матеріалознавець може назвати дрібнозернистою структурою, на зображенні може виглядати як структура крупнозерниста, якщо характеристичний розмір зерен становитиме значну частину від розміру зображення, а самих зерен на зображенні буде лише декілька. Ми використовуємо терміни “дрібнозернистий” і “крупнозернистий” саме в цьому сенсі. Дати точні кількісні визначення цим термінам неможливо, оскільки вони мають якісний характер.

Зазначене зауваження добре узгоджується з поняттям “самоподібності”, яке, власне, і є визначальним у фрактальній геометрії. Тобто, якщо просто змінити масштаб зображення, то на ньому виявляться нові деталі, яких не було видно раніше, оскільки вони мали мати на зображенні розмір, менший за піксель. Оскільки фізичні об’єкти не є ідеальними геометричними фракталами, завжди, говорячи про ті чи інші значення мультифрактальних розмірностей, слід вказувати діапазон розмірів, для якого вони визначені.

Але хоча на кожному зображенні наведено фізичний масштаб (по суті, фізичний розмір одного пікселя зображення), на даному етапі характеристики структури він не відіграє визначальної ролі, тому що одиницею зображення, що мінімально виділяється, і з якою має справу програма обробки зображення, є піксель.

Саме тому у програмі Fraculator при обчисленні мультифрактальних розмірностей вказуються діапазони фрактальності в пікселях, а не будь-які фізичні розміри. Це принципово важливий момент: адже та сама структура при різному ступені збільшення може мати різні мультифрактальні характеристики, і характер їхньої залежності від ступеня збільшення — питання додаткового дослідження структури та властивостей матеріалу.

Як приклад, розглянемо деяку структуру матеріалу, який було отримано шляхом спікання чи гарячого пресування композитів із порошків різного складу. При невеликому збільшенні буде чітко видно структуру, в якій у якості зерен виступатимуть частинки різних матеріалів, а система виділених границь відповідатиме границям між зернами різного складу. Однак при збільшенні більшою мірою проявиться внутрішня структура самих зерен, і мультифрактальні характеристики, що обчислюються, будуть відноситися вже до структури цього порядку розмірів. Вочевидь, що при невеликих збільшеннях визначальну роль у фрактальних характеристиках грають зерна як такі, оскільки їхню внутрішню структуру просто не видно, а при великих збільшеннях основну роль відіграє внутрішня структура цих зерен



Структура в

Рис. 6. Вплив гаусового розмиття на мультифрактальні розмірності зображень структур на рис. 2

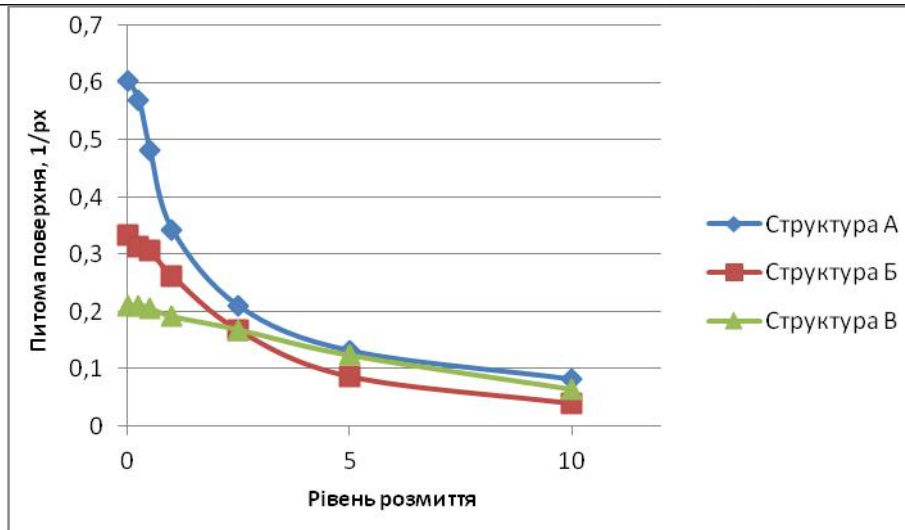


Рис. 7. Вплив гаусового розмиття на питому поверхню границі для зображень структур на рис. 2

Тому за характеристичними розмірами діапазону фрактальності в пікселях, співвідносячи його із зображенням, завжди можна зрозуміти, із фрактальними характеристиками якої структури ми маємо справу. При цьому часто здатність приладів для отримання зображення структур визначає, які саме характеристичні підструктури будуть відігравати основну роль при обчисленні мультифрактальних характеристик структури в цілому.

На жаль, точні, математично вивірені критерії розмитості зображення неможливі у зв'язку з тим, що вони відштовхуються від ідеального, абсолютно чіткого зображення, яке у дослідника відсутнє. Тут застосовні нечіткі критерії оцінювання дослідником, наприклад, у балах або інші, засновані на досвіді, а не на конкретних вимірах. Укупі з уже згаданою величезною роллю дослідника у виборі об'єкта дослідження можна висловити припущення, що застосування нейронних мереж із застосуванням машинного навчання і систем штучного інтелекту в матеріалознавстві має великі перспективи. Ідеї такого застосування нейронних мереж не новинка, їм уже кілька десятиліть [11], але розвиток цієї галузі та революційні досягнення останнього часу призводять до того, що розроблення таких спеціалізованих мереж стає повсякденним науковим (ледь не навчальним) завданням [12-14]. В якості одного з підзавдань такого застосування може бути як оцінка якості (і навіть виправлення) зображень, так і вибір об'єктів дослідження.

Висновки

1. Розмиття зображення структури матеріалу впливає на обчислювані фрактальні та звичайні геометричні (питома поверхня системи границь) характеристики, причому вплив розмиття на характеристики зображення структури матеріалу виявляється істотно меншим, ніж на характеристики системи виділених на зображенні границь обраних структурних елементів.

2. Розмиття зображення призводить до згладжування систем границь і, як наслідок, втрати деталізації та зменшення обчислюваних значень мультифрактальних розмірностей і питомої поверхні системи границь. Вплив на дрібнозернисті структури та структури з розвиненими границями виявляється більшим, ніж на крупнозернисті структури та структури з гладкими границями.

3. Кількісні оцінки допустимого ступеня розмиття вихідних зображень неможливі, а тому досліджувану структуру має бути чітко видно у всьому діапазоні її розмірів, до окремих пікселів (бажано, щоб мінімальні характеристичні розміри досліджуваної структури на зображенні були не менше 2–3 пікселів).

4. Основну роль при підготовці зображень грає дослідник-матеріалознавець, який обирає зміст структури матеріалу для дослідження (а, відповідно, і масштабування при отриманні зображення) і стежить, щоб одержуване зображення мало максимальну чіткість елементів, які досліджуються.

5.3 розглянутого матеріалу можна зробити попередній висновок, що одним з можливих перспективних підходів до оцінки якості зображень матеріалознавчих структур може бути застосування систем штучного інтелекту з використанням машинного навчання.

Список використаних джерел:

1. Pennycook, S.J., Li, C., Li, M. et al. *Material structure, properties, and dynamics through scanning transmission electron microscopy*. J Anal Sci Technol 9, 11 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40543-018-0142-4>
2. Agnieszka Szczotok. Guidance and advice to image analysis applied in materials science. *Czasopismo Techniczne*, 2016, *Mechanika Zeszyt 3-M* (10) 2016, s. 15-21. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.16.115.5726>
3. Chanona-Pérez, J. et al. *Image Processing Methods and Fractal Analysis for Quantitative Evaluation of Size, Shape, Structure and Microstructure in Food Materials*. In *Food Engineering: Integrated Approaches*. Food Engineering series. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-75430-7_16
4. И.Е. Красикова, В.В. Картузов, И.В. Красиков. *Характеристики компьютерной реализации алгоритма вычисления фрактальной размерности двумерных изображений*. В сб. Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. К.: ИПМ НАНУ, 2013, вып. 15, с 69–73.
5. Красіков І.В., Красікова І.С., Картузов В.В., Красіков А.І. *Комп'ютерна програма «Fraculator 2»*. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №115438. Україна, 25.10.2022.
6. И.Е. Красикова, И.В. Красиков, В.В. Картузов. *Определение фрактальных характеристик структуры материалов методом мультифрактального анализа изображений*. Вычислительный эксперимент на модельных объектах. В сб. Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. К.: ИПМ НАНУ, 2007, вып. 9, с.79–84.
7. Linda G. Shapiro , George C. Stockman . *Computer Vision* . Prentice Hall, 2001. 580 p.
8. Волчук В.Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 3. С. 12–19.
9. Волчук В.Н.. Определение чувствительности мультифрактальных характеристик металла *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 12 (213). С. 10–14.
10. С.А. Салтыков. *Стереометрическая металлография*. (Стереология металлических материалов). — М.: Металлургия, 1976. — 272 с.
11. H.K.D.H. Bhadeshia. *Neural Networks in Materials Science*. ISIJ International, Vol. 39 (1999), No. 10, pp, 966-979
12. Shapovalova, M., Vodka, A. Methods for recognizing the microstructure of a material. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 23 (1245), 56–61, doi:10.20998/2413-4295.2017.23.09.
13. Применение искусственных нейронных сетей в материаловедении. Под ред. Ю.Н.Колмогорова. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2021. — 68 с. — ISBN 978-5-7996-3337-0.
14. Pyzer-Knapp, E.O., Pitera, J.W., Staar, P.W.J. et al. Accelerating materials discovery using artificial intelligence, high performance computing and robotics. *npj Comput Mater* 8, 84 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41524-022-00765-z>

Рецензент: Гордієнко Ю.Г., професор кафедри обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» с.н.с., д.ф.-м.н.