

I.Є. Красікова, I.В. Красіков, В.В. Купрін, О.О. Васильєв

## **Безпороговий метод визначення складу двофазного композиту за мікроскопічними зображеннями**

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м.Київ, Україна, [i.krasikova@ipms.kyiv.ua](mailto:i.krasikova@ipms.kyiv.ua)*

Запропоновано новий метод оцінки кількісного аналізу складу двокомпонентних композитів за зображенням, що не використовує порогового значення бінарзації і має більшу точність порівняно з традиційними методами бінарзації з використанням порогового значення. Метод є стійким щодо зміни контрасту і добре працює в широкому діапазоні контрастності зображень.

**Ключові слова:** композиційний матеріал, аналіз матеріалу, комп'ютерне моделювання, обчислювальні методи, аналіз зображень.

*Подано до редакції 09.07.2024; прийнято до друку 04.02.2025.*

### **Вступ**

У сучасному матеріалознавстві аналіз складу матеріалів є наріжним каменем для розуміння їх властивостей і потенційних застосувань. Під час дослідження двокомпонентних матеріалів, на кшталт «матриця-включення», визначення кількісного вмісту кожної фази відіграє ключову роль. Існує низка фізичних методів для визначення складу таких матеріалів, включно з хімічним аналізом, рентгеновською дифракцією, спектроскопією рентгеновського випромінювання, скануючою електронною мікроскопією та аналізом зображень, отриманих за допомогою оптичної мікроскопії.

Останнім часом методи аналізу зображень, отриманих за допомогою оптичної або електронної мікроскопії, розглядаються як інструмент для визначення кількісного складу двокомпонентних матеріалів [1-7]. Порівняно з іншими методами аналізу, цей метод виділяється кількома ключовими перевагами, що роблять його особливо корисним і ефективним у практиці матеріалознавства. Мікроскопія має здатність розрізняти навіть найдрібніші деталі та фази в матеріалі, що дає змогу точніше визначати їхній вміст. Крім того, для мікроскопії часто не потрібна складна попередня обробка зразка, що прискорює процес аналізу і робить

його більш доступним для широкого кола дослідників. Отримання зображень також відбувається відносно швидко, що дає змогу проводити аналіз великої кількості зразків у короткі терміни. Отже, розробка методів оцінки кількісного аналізу складу матеріалу за зображеннями з використанням можливостей обчислювальної техніки є актуальним завданням, що має важливе практичне значення.

У цій роботі ми розглядаємо двокомпонентні матеріали («матриця-включення»), у яких компоненти не є взаємно розчинними чи якимось інакше взаємодіють із утворенням деяких третіх компонентів, тобто які на зображенні, отриманому тим чи іншим способом мікроскопії, мають різні кольори/яскравості.

Метод оцінки складу композиту заснований на тому математичному факті, що відношення площі одного компонента до площі іншого на двовимірному зображенні перерізу тривимірного об'єкту відповідає відношенню їх об'ємів (з якого, знаючи густини компонентів, можна отримати відношення мас).

Звичайне рішення цієї задачі полягає в тому, щоб знайти кількості пікселів, що відповідають тій чи іншій фазі. Для цього щодо кожного пікселя зображення має бути прийняте рішення, до якої фази він відноситься. В даний час ця задача бінарзації

[8, 9], або сегментації, вирішується різними пороговими методами, тобто рішення про належність кожного пікселя приймається на основі значення його яскравості, що порівнюється з деяким *пороговим* значенням. Такий порог може бути як глобальним [10], тобто для всього зображення обчислюється єдине порогове значення, так і локальним [11], коли рішення про відповідність пікселя приймається на основі значень пікселів в деякій його околиці. Ці останні методи стають у нагоді при не дуже якісних зображеннях, яскравість яких в різних частинах суттєво відрізняється. Такі порогові методи застосовуються в широко використовуваному в металографії програмному забезпеченні, зокрема, в таких програмах, як ImageJ [12], SIAMS [13], AMIC [14].

Порогові методи працюють з зображенням, без урахування фізичного сенсу цього зображення.

Для зображення двокомпонентного композиту в ідеалізованих умовах гомогенного оптичного відгуку кожного з компонентів та відсутності спотворень зумовлених умовами знімання (характер та кут падіння освітлення, особливості оптики та ін.) гістограма інтенсивності зображення мала б вигляд двох піків, строго локалізованих на одному певному значенні інтенсивності кожен. В такому випадку вміст кожного з компонентів був би строго пропорційним висоті відповідного піка, а значення висот дозволяли б повністю описати компонентний склад композиту. Як відомо, під дією численних незалежних факторів згідно з центральною граничною теоремою фізична величина отримує нормальний (гаусовий) розподіл. Залучення методів математичної статистики до поставленої задачі дає змогу оцінити склад двокомпонентного матеріалу, не звертаючись до порогового значення, розглядаючи піки на гістограмі як «розмиті» за нормальним розподілом дискретні значення. Саме на цьому ґрунтується запропонований в даній роботі метод рішення задачі оцінки складу двокомпонентного матеріалу, який *не* використовує порогове значення взагалі.

## I. Методи

Розробка алгоритмів виконувалася з використанням таких розділів математики, як теорія ймовірностей та математична статистика (формули нормального розподілу), чисельні методи рішення систем нелінійних рівнянь.

Реалізація запропонованих алгоритмів виконана з використанням мови C++ (вільно розповсюджуваний компілятор Visual C++ 2022), вільно розповсюджуваних бібліотек wxWidgets (для обробки зображень) та ALGLIB (для вирішення задач апроксимації методами найменших квадратів з використанням методу градієнтного спуску).

При необхідності попередня обробка зображень (зокрема, вирізання із зображення потрібної області) виконувалася за допомогою IrfanView.

В роботі в якості модельного матеріалу використані фотографії матриці наступного хімічного складу: Al-6,0Cu-0,4Mn (мас. %). Цей сплав, має,

насамперед, високу пластичність, добрі характеристики міцності, добру термостійкість та високу корозійну стійкість. Порошки матричного сплаву було отримано методом аргонового розпилення розплаву. В якості зміцнюючих часток в алюмоматричному композиті, що досліджувався, були використані порошки SiC із середнім розміром частинок 14 мкм. Дослідні композитні матеріали були отримані методом гарячої екструзії пресованих заготовок. Зображення структури зразків отримано методами оптичної мікроскопії з використанням мікроскопу MIM-9 [15].

Для порівняння результатів, отриманих розробленим методом, з існуючими пороговими методами використовувались метод Оцу [16, 17], метод градієнтів [18], метод Бредлі [19] та метод Сауволи [20].

## II. Результати

Метод ґрунтується на тому, що гістограма зображення для системи матриця-композит зазвичай має чітко виражений характер із двома максимумами (як-от наведена на рис. 1). Природньо, виникає припущення про гаусову природу максимумів на гістограмі (що підтверджується експериментально — на рисунку пурпуровим кольором показані отримані за допомогою методу мінімальних квадратів апроксимуючі криві нормального розподілу).

Отже, ми можемо розглядати піки гістограм як два нормальні розподіли яскравостей пікселів — для темних і світлих ділянок, і замість підрахунку абсолютних кількостей пікселів обчислювати *відношення* кількостей «темних» та «світлих» пікселів, яке за нашим припущенням дорівнює відношенню площин під гаусовими кривими. Пікселі посередині між цими двома кривими ігноруються; ми розглядаємо їх як деякий «перехідний шум».

Алгоритм обробки зображення, на якому чітко виділяються два піки, полягає в побудові стандартної гістограми яскравості (з подальшим її згладжуванням за 3-5 точками для усунення зашумленості). Після цього на гістограмі ідентифікуються два максимуми (як точки, для яких виконується умова, що сусідні ліворуч і праворуч точки мають менші значення).

За знайденими максимумами піків будуються дві апроксимації гаусової кривої

$$f(x) = c_1 e^{-\frac{(x-c_2)^2}{c_3}},$$

при цьому площа під кривою, яка бере участь в обчисленні кількісного складу композиту, дорівнює

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} c_1 e^{-\frac{(x-c_2)^2}{c_3}} dx = c_1 \sqrt{\pi c_3}$$

На рис. 2 показано гістограми і результати розрахунків для матриці Al-6Cu-0.4Mn з включеннями SiC з кількістю відповідно 5, 10, 15 і 20 об.%. Результати розрахунків за запропонованим методом та, для порівняння, за поширеними методами

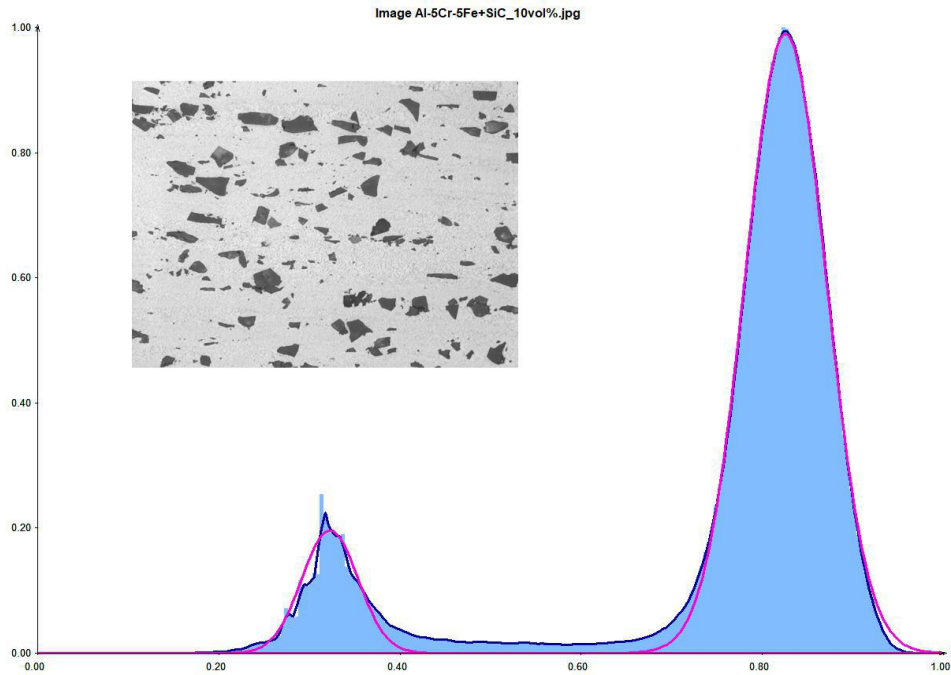


Рис. 1. Гістограма яскравості для зображення матриці Al-6Cu-0.4Mn з 10 об.% включень SiC.

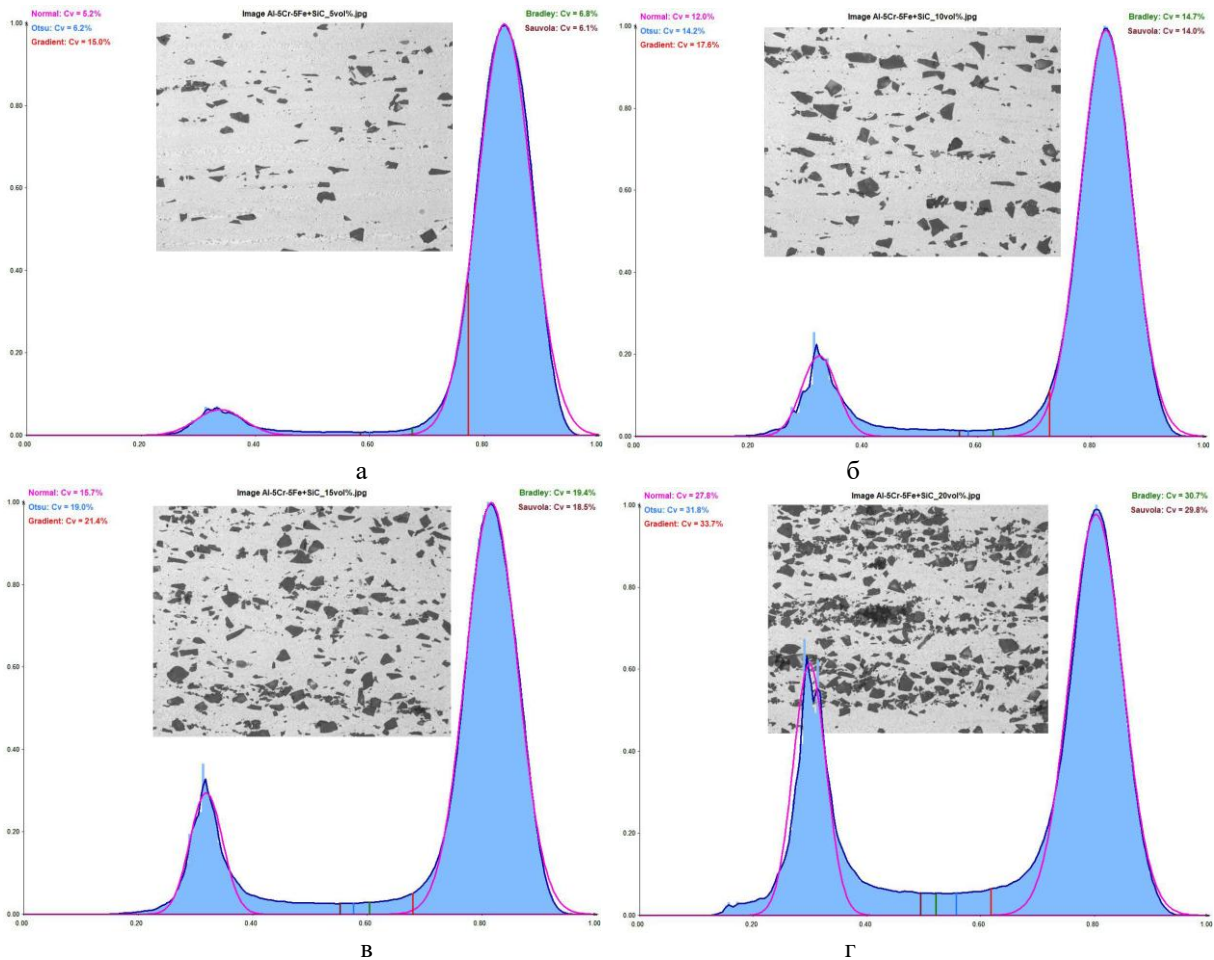


Рис. 2. Гістограми, приклади зображень та результати розрахунків складу композиту Al-6Cu-0.4Mn з різною кількістю включень SiC запропонованим методом та із застосуванням стандартних методів бінаризації. Кількість SiC, об.%: а — 5, б — 10, в — 15, г — 20.

Таблиця 1.

Результати розрахунків складу композиту Al-6Cu-0.4Mn з різною кількістю включень SiC запропонованим методом та із застосуванням стандартних методів бінаризації

Вміст SiC, об. %	Гаусова крива (запропоновано)	Оцу	Градiєнтний	Бредлі	Сауволи
5%	5,2	6,2	15,0	6,8	6,1
10%	12,0	14,2	17,6	14,7	14,0
15%	15,7	19,0	21,4	19,4	18,5
20%	27,8	31,8	33,7	30,7	29,8

Таблиця 2.

Вплив зниження контрастності на результати розрахунків різними методами складу композиту Al-6Cu-0.4Mn з 10% включень SiC

Зниження контрасту, од.	Гаусова крива (запропоновано)	Оцу	Градiєнтний	Бредлі	Сауволи
0	12,0	14,2	17,6	14,7	14,0
25	12,2	14,3	19,3	14,6	13,8
75	11,8	14,5	27,1	14,1	11,8
100	11,2	14,6	33,3	12,8	Не працює

бінаризації (метод Оцу, градiєнтний, методи Бредлі та Сауволи) наведені в табл. 1.

Як видно з наведеної таблиці, запропонований метод дає найкращі результати, найбільш близькі до експериментальних. Ця тенденція зберігається навіть для останнього зображення, незважаючи на те, що, як видно на рис. 2, у цьому випадку лівий («темний») пік погано виражений і має шуми на вершині, тож доводиться збільшити кількість точок, що використовуються для його згладжування.

Слід також зауважити, що оскільки зміна контрастності зображення теоретично є афінним перетворенням гістограми, в ідеальному випадку вона не міняє обчислюване відношення площин під кривими. Спостережувані відхилення пов'язані в першу чергу з тим, що насправді гістограма не є неперервною функцією, а має дискретний характер, а крім того, при пошуку максимумів згладжування, що застосовується, дещо міняє значення максимальної висоти піку.

В табл. 2 наведені результати розрахунків різними методами для вихідного зображення та зображень зі зниженою контрастністю (використовувалось зниження контрастності в програмі IrfanView на 25, 75 та 100 одиниць). Таким чином, доведено, що метод має не тільки найбільшу точність, але й є стійким

щодо зміни контрасту і добре працює в широкому діапазоні контрастності зображень.

Ці порівняльні результати демонструють, що врахування специфіки фізичної системи, що лежить в основі зображення, окупається підвищенням точності аналізу цього зображення.

## Висновки

Таким чином, можна зробити висновок, що запропонований принципово новий метод оцінки кількісного аналізу складу матеріалу за зображенням, що не використовує порогового значення взагалі, має більшу точність порівняно з традиційними методами бінаризації з використанням порогового значення.

Цей метод особливо підходить для застосування при визначенні кількісного складу двокомпонентних композитів як той, що забезпечує більшу точність та стійкість (метод дає стійкі результати незалежно від контрастності зображення).

**Красікова І.Є.** – к.ф.-м.н., н.с.;

**Красіков І.В.** – к.т.н., с.н.с.;

**Курпрін В.В.** – н.с.;

**Васильєв О.О.** – к.х.н., доц.

- [1] V.A. Komarov, A.A. Pavlov, *Determination of fibers volume fraction in layered composite materials by optical methods*. Computer Optics, 46(3), 473 (2022); <http://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1068>.
- [2] С.В. Litovchenko, Т.В. Malykhina, L.O. Shpakhina, V.O. Shpakhina, *Automation of the analysis of metallographic structures*. Bulletin of Kharkiv National University, 960, 215 (2011).
- [3] A.F. Tarasov, L.V. Vasilyeva, M.A. Efremov, *Automation of processing of microstructures of metals based on contour and texture analysis of images*. Scientific works of DonNTU, 2(25), 109 (2017), Series “Informatics, Cybernetics and Computer Science”; <http://doi.org/10.31474/1996-1588-2017-2-25-109-117>.
- [4] O.M. Gorbenko, M.L. Felshtyn, D.Yu. Usachev, P.G. Ulyanov, B.V. Senkovsky, V.K. Adamchuk, A.O. Golubok. *Automatic recognition of the structures of ferrite-pearlite steels from images obtained by atomic force microscopy*, Scientific Instrumentation, 22(4), 62 (2012).
- [5] Zuodong Niu, Handong Li, *Research and analysis of threshold segmentation algorithms in image processing*, Journal of Physics: Conf. Series, 1237(2), 1 (2019); <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/2/022122>.

- [6] Asad Ullah, Guoquan Liu, Hao Wang, Dil Faraz Khan, Matiullah Khan *A framework for image processing, analysis and visualization of materials microstructures using ImageJ package*. Chinese journal of stereology and image analysis, 17(4), 301 (2012).
- [7] M.J. Demkowicz, M. Liu, I.D. McCue, M. Seita, J. Stuckner, K. Xie. *Quantitative multi-image analysis in metals research*. *MRS Communications*. Computational Approaches for Materials Discovery and Development Perspective, 12(6), 1030 (2022); <https://doi.org/10.1557/s43579-022-00265-7>.
- [8] V. Hrytsyk, M. Petryk. *Image segmentation in computer vision diagnostic systems*. System technologies, 6 (113), 92 (2017).
- [9] W. Zhou, X. Ma, Y. Zhang. *Research on image preprocessing algorithm and deep learning of iris recognition*. Journal of Physics: Conference Series, 1621 (1), 1 (2020); <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1621/1/012008>.
- [10] Amer Tahseen Abu-Jassar, Svitlana Sotnik, Tetiana Sinelnikova, Vyacheslav Lyashenko. *Binarization Methods in Multimedia Systems when Recognizing License Plates of Cars*. International Journal of Academic Engineering Research (IJAER), 7(2), 1 (2023); [www.ijeais.org/ijaer](http://www.ijeais.org/ijaer).
- [11] James F. Peters. *Foundations of Computer Vision* (Springer, Canada, 2017); <http://doi.org/10.1007/978-3-319-52483-2>.
- [12] Jurjen Broeke, Jose Maria Mateos-Perez, Javier Pascau. *Image Processing with ImageJ* (Packt Publishing, 2015).
- [13] SIAMS Industrial Processing and Analysis System. <http://siams.com>.
- [14] A.I. Khomenko, E.V. Khomenko. *Program for automation of microstructural analysis of materials*. Powder Metallurgy, 1/2, 122 (2007).
- [15] A. Slipenyuk, V. Kuprin, Yu. Milman, V. Goncharuk, J. Eckert. *Properties of P/M processed particle reinforced metal matrix composites specified by reinforcement concentration and matrix-to-reinforcement particle size ratio*. Acta Materialia, 54(1), 157(2006); <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.08.036>.
- [16] C. Rasche. *Computer Vision* (Bucharest, Polytechnic University of Bucharest, 2019).
- [17] N. Otsu *A thresholding selection method from graylevel histogram*. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 9, 62 (1979); <http://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.
- [18] E. Polak. *Numerical methods of optimization. A unified approach*. (1976).
- [19] D. Bradley, G. Roth. *Adaptive thresholding using the integral image*. Journal of graphics tools, 12(2), 13(2007); <http://doi.org/10.1080/2151237X.2007.10129236>.
- [20] J. Sauvola, M. Pietikainen. *Adaptive Document Binarization*. *Pattern Recognition*, 33, 225 (2000); [http://doi.org/10.1016/S0031-3203\(99\)00055-2](http://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00055-2).

I.E. Krasikova, I.V. Krasikov, V.V. Kuprin, O.O. Vasiliev

## **Threshold-free method for determining the composition of a two-phase composite from an microscopy images**

*Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NASU, Kyiv, Ukraine, [i.krasikova@ipms.kyiv.ua](mailto:i.krasikova@ipms.kyiv.ua)*

A new method is proposed for estimating the quantitative analysis of the composition of two-component composites from an image. This method does not rely on a binarization threshold and offers greater accuracy compared to traditional methods that do. It is robust to contrast changes and performs well across a wide range of image contrasts.

**Keywords:** composite material, material analysis, computer modeling, computational methods, image analysis.