

Н.В. Карпенко, А.С. Кандела, В.В. Соловйов

КІЛЬКІСНА МЕТАЛОГРАФІЯ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО АНАЛІЗУ ФОТОГРАФІЇ СПЛАВУ

Анотація. За допомогою комп'ютерного аналізу фотографії отримано дані кількісної металографії евтектик, такі як об'ємний вміст фазових складових, величина фаз, відстань між подібними частинками тощо.

Ключові слова: кількісний аналіз, мікроструктура, комп'ютерний аналіз фотографії, об'ємний вміст фаз.

Вступ. Евтектична кристалізація відіграє важливу роль у процесах затвердіння промислових сплавів. Подвійним евтектикам присвячена велика кількість класичних досліджень. Але для багатокомпонентних систем дуже рідко зустрічається навіть морфологічний опис евтектичних структур. У багатокомпонентних сплавах евтектичні ділянки можуть мати площу, замалу для мікромеханічних досліджень, але вони вносять вклад у механічні та експлуатаційні властивості всього сплаву. Отже, перспективним науковим напрямком є дослідження багатофазних природних та штучних композитів.

Кількісна металографія широко застосовується для визначення характеристик мікроструктури сплаву, а саме: об'ємного вмісту фаз, розміру зерен, питомої поверхні границь зерен, відстані між подібними частинками або фазами тощо. Ці характеристики необхідно знати для побудови діаграм стану, при дослідженнях фазових перетворень, процесів рекристалізації, дифузії, для оцінювання фізичних, механічних та експлуатаційних характеристик сплавів [1].

При металографічному аналізі сплавів досліджувану структуру можна порівнювати зі схематичними зображеннями еталонних структур ASTM (напівкількісний метод) або кількісно визначати характеристики сплаву [2]. У першому випадку реальній структурі приписують такий бал зерна N , який має відповідна схема. Недоліком цих досліджень є суб'єктивне визначення N , тому можливі помилки оцінювання, та замало одержаної інформації. У другому випадку характеристики сплаву вимірюють ручним або автоматизованим способом,

наприклад, за допомогою структурного аналізатора «Eriquant». Але кількісний аналіз структури сплаву, фази якого мають подібну хімічну стійкість, також може привести до неточних результатів.

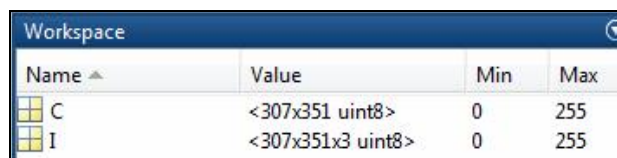
Нещодавно було розроблено комерційне програмне забезпечення для аналізатора «Eriquant», що дозволяє зробити структурний аналіз трифазного зразка, оцінити величину зерен, розрахувати об'ємний і масовий розподіл фаз та напівкількісним методом визначити середній коефіцієнт відбиття світла фазами [3]. Але максимальне збільшення, яке підтримує аналізатор «Eriquant» – $\times 1000$, що у багатьох випадках недостатньо для роботи із мікроструктурою евтектик. Тому метою даної роботи є розробка методики комп'ютерного аналізу фотографії сплаву для визначення кількісних характеристик мікроструктури багатокомпонентних сплавів.

Основна частина. Фазові складові сплаву можна ідентифікувати за допомогою мікрорентгеноспектрального (або рентгеноструктурного) та металографічного аналізів. В обох випадках є можливість зробити фотографію ділянок сплаву зі збільшенням, яке дозволяє чітко розрізнити окремі фази. Комп'ютерний аналіз фотографії полягає у попиксельному зчитуванні та аналізі отриманої інформації.

У середовищі MATLAB для завантаження зображень використовують функцію *imread*, якій в якості параметрів передають ім'я графічного файлу та його формат, наприклад:

```
C=imread('D:/image004.jpg');
```

На виході отримують масив, що відповідає розмірності зображення зі значеннями в форматі uint8 (рис. 1).



Name	Value	Min	Max
C	<307x351 uint8>	0	255
I	<307x351x3 uint8>	0	255

Рисунок 1 – Результат роботи функції *imread*

Якщо вихідне зображення має глибину кольору не більше 256, то матриця *C* буде двовимірною і кожне її значення буде представляти відповідний рівень яскравості точки. Якщо ж точка вихідного зображення представлена, наприклад, 24 бітами, то матриця *I* матиме максимальну розмірність $1024 \times 1024 \times 3$, де третя розмірність буде відповідати колірним складовим вихідного зображення [4]. Тоді двовимірний масив для кожного кольору можна зробити відокремлюючи

шари даних, наприклад, $red=c(:, :, 1)$; А після одержання трьох двовимірних матриць, їх можна об'єднати у одну двовимірну матрицю яскравості тощо.

Дані з двовимірних матриць можна візуалізувати у вигляді гістограми, яку у пакеті MATLAB будують за допомогою функції *imhist*. Значення меж окремих фаз використовують для розрахунку їх об'ємного вмісту та інших кількісних характеристик сплаву.

Методику комп'ютерного аналізу фотографії перевірили на сплавах, для яких є експериментально визначені кількісні характеристики. Наприклад, на рис. 2,а наведено фотографію евтектичного сплаву Fe-3,8% В, який утворюють фази Fe та Fe₂В. За рахунок меншої хімічної стійкості, ніж у фази Fe₂В, фаза Fe на фотографії має темний колір [5]. Гістограма кольору, що побудована за цією фотографією, наведена на рис. 2,б.

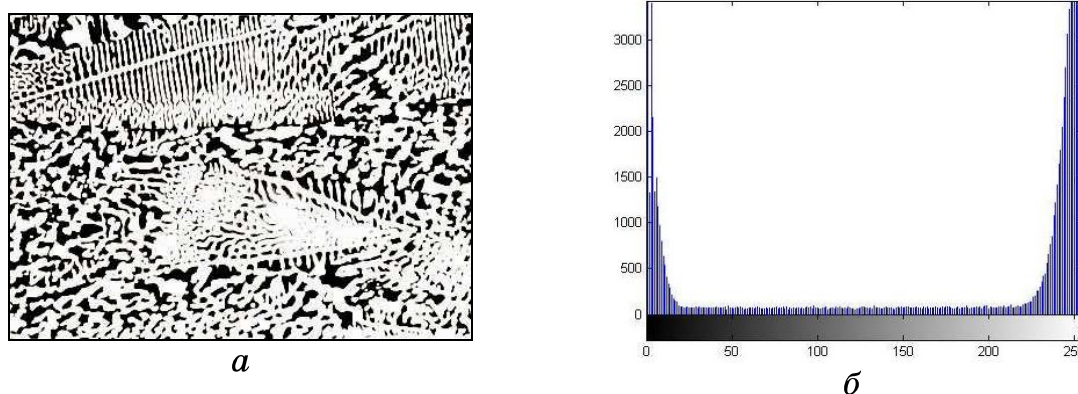


Рисунок 2 – Сплав Fe-V: фотографія x500 (а); гістограма кольору (б)

Об'ємний вміст кожної фази (V_p) знаходять як відношення суми пікселів зазначеного діапазону кольору до загальної кількості пікселів. При лінійному аналізі середній розмір фаз дорівнює

$$l_c = \frac{\sum_i l_{\alpha_i}}{n_i \cdot M}, \quad (1)$$

де l_{α_i} – розмір i -ої частинки фази α , що належить довільній січній; n_i – кількість частинок цієї фази, які перетинає довільна січна; M – масштаб зображення (збільшення).

Для геометричного визначення величини зовнішньої питомої поверхні фази [6] використовують формулу

$$S_w = \frac{f \sum_{i=1}^N n_i l_c^2}{\rho \sum_{i=1}^N n_i l_c^3}, \quad (2)$$

де f – фактор форми частинки фази ($f=6$ для сферичних та кубічних, $f=6,4 \div 7,7$ для округлених та загострених, $f=12$ для призм, $f=18$ для пластин, $f=18 \div 30$ для тонких голчатих частинок); ρ – густина; d_i – середній діаметр частинки.

Для штучних композитів основними структурними параметрами, які визначають ефективність частинок наповнювача, є середній вільний проміжок між частинками

$$l_p = \sqrt{\frac{2l_c^2}{V_p}(1 - V_p)}. \quad (3)$$

У таблиці 1 наведено декілька результатів кількісної металографії сплавів, одержаних за допомогою комп'ютерного аналізу фотографій.

Таблиця 1

Результати кількісної металографії подвійних сплавів

	Фази	V_p , %	n^*	c , МКМ	l_c , МКМ експ	S_w , М ² /Г
Fe-3,8% В	Fe	42±3	134	111±7	–	–
	Fe ₂ B	58±2	133	136±11	141±3	0,011±0,002
Fe-12% Р [7]	Fe	54±2	116	55±4	–	–
	Fe ₃ P	46±3	118	93±7	87±3	0,020±0,004
Fe-3% С-1,8% В- 1% Р [8]	Fe	57±2	93	14±3	2,2±1,8	–
	Fe ₃ C	41±2	95	18±5	6,9±4,1	0,044±0,007

* – кількість частинок, що перетинає довільна січна

Окрім того, комп'ютерний аналіз фотографії дозволяє одержати статистичні дані. Наприклад, на рис. 3,а наведено розподіл за розміром частинок фази Fe₂B у евтектичному сплаві Fe-3,8% В [5].

За статистичними даними такого виду можна визначити розгалуженість евтектики (диференцировку колонії)

$$\delta = \frac{x_{\max y}}{\sqrt{M}}. \quad (5)$$

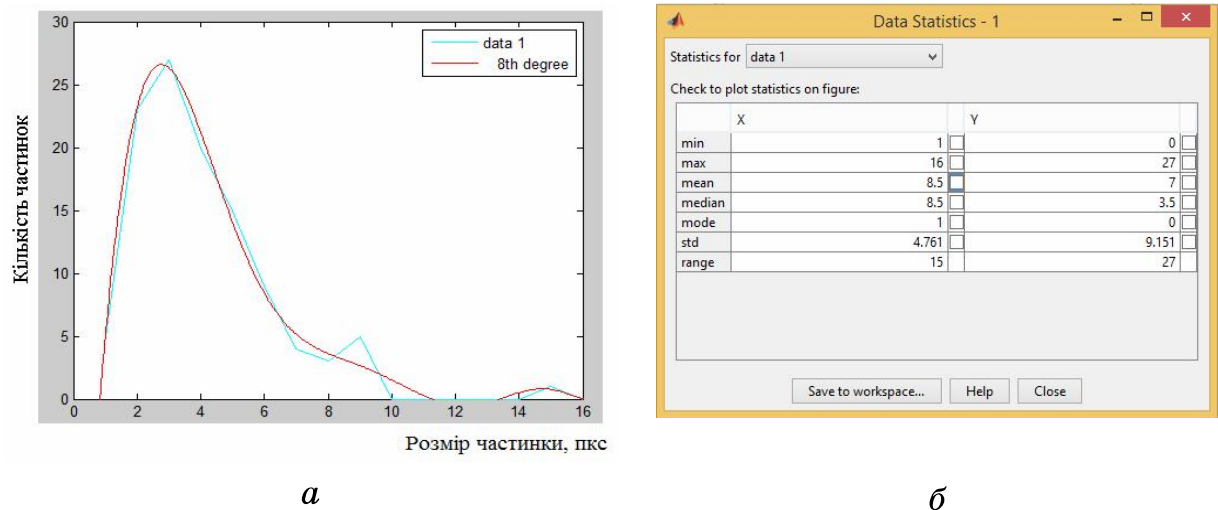


Рисунок 3 – Розподіл частинок фази Fe_2V у сплаві Fe-3,8%В за розміром (а); статистичні дані (б)

Диференцировка колонії зв'язана зі швидкістю руху фронту кристалізації (v) формулою

$$\delta = k_t v^{-n}, \quad (6)$$

де k і n – константи.

Визначивши δ можна побудувати графік розподілу локальної швидкості кристалізації евтектичної колонії та знайти миттєве прискорення. Наприклад, на рис. 4 показано як у сплаві Fe-V (рис. 2,а) на довільній січній змінюється v^n залежно від δ .

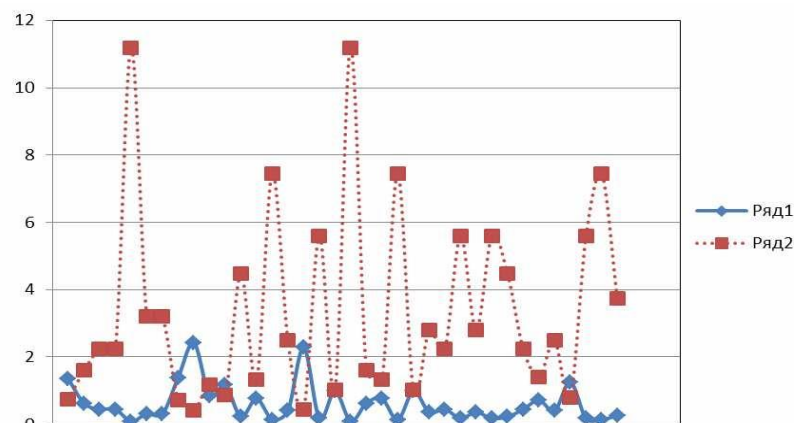


Рисунок 4 – Взаємозв'язок між диференцировкой евтектичної колонії (ряд 1) та локальною швидкістю кристалізації (ряд 2)

Для подвійних евтектик порівняння експериментально одержаних даних із розрахунковими показує достатню точність розрахунків.

Комп'ютерний аналіз фотографії дозволяє розрізнити складові багатофазного сплаву та якісно показати розподіл домішок.

На рис. 5,*а* наведено фотографію сплаву Fe-C-Mo-V, зроблену за допомогою електронного мікроскопу, зі збільшенням $\times 10000$. Комп'ютерний аналіз цієї фотографії дозволяє чітко розрізнити окремі фази сплаву (рис. 5,*б*), оскільки вони мають різний коефіцієнт відбиття світла. Отже, можна побудувати гістограму, за якою визначити межі яскравості кожної фази (рис. 6). Кількісні характеристики потрійного сплаву визначають за формулами, аналогічними наведеним вище.

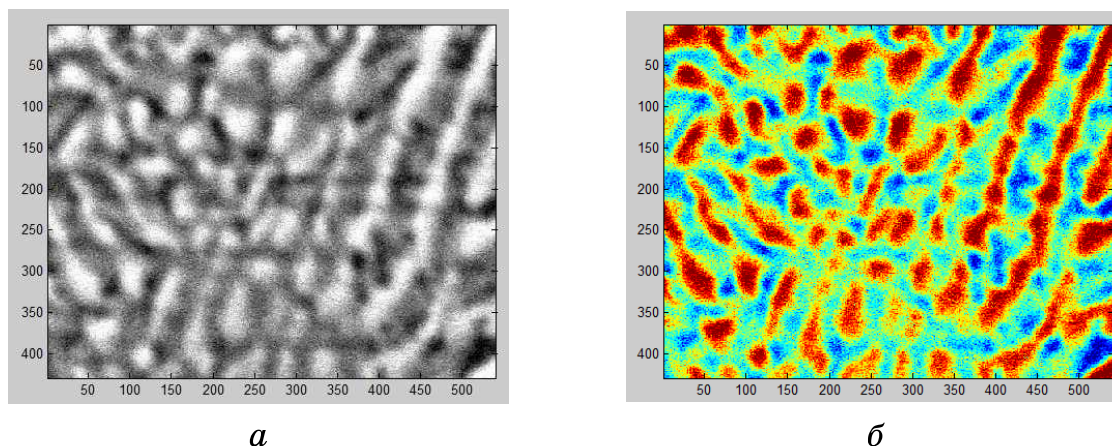


Рисунок 5 Сплав Fe-C-Mo-V: зі збільшенням $\times 10000$ (*а*); розподіл яскравості за фазами сплаву (*б*)

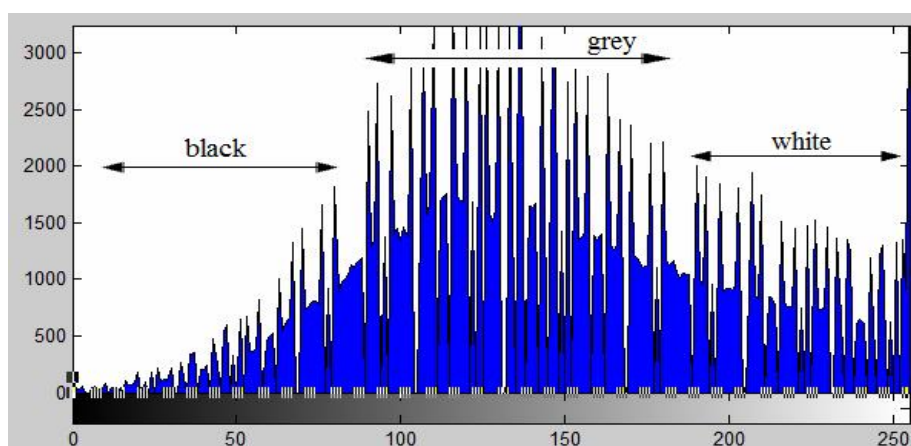


Рисунок 6 – Гістограма побудована за даними, отриманими з рис. 5,*б*

Висновки. Комп'ютерний аналіз фотографії сплаву з метою визначення кількісних характеристик є перспективним методом сучасних металографічних досліджень. Регулювання контрастності зображення та накладання відповідних кольорових фільтрів дозволяють підвищити точність вимірювань. Це може стати в нагоді у випадку, коли за допомогою методик хімічного або теплового травлення неможливо точно розрізнити фази сплаву. Окрім того, цей метод дозволяє значно зменшити час проведення досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ильинкова Т.А. Металлографический анализ. Учебное пособие [Текст] / Т.А. Ильинкова. – Казань: Казан. нац. иссл техн. унт-т. – 2014. – 106 с.
2. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография /С. А. Салтыков – М.: Металлургия. – 1976. – 270 с.
3. <http://engineer-service-center.in.ua/index.php/инструкция-epiquant.html>
4. Теория цвета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zavadskaaya.wordpress.com/2011/12/26/теория-цвета/> – Загл. с экрана.
5. Спиридонова, И.М. К вопросу о строении тройной эвтектики в сплавах. / И.М. Спиридонова, Н.В. Карпенко // Збірник наукових праць міжн. конф. “Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур” (Харків, 21-23 жовтня 2009 р). – С. 338-341.
6. Никитин Ю.И. Методы, приборы и результаты определения удельной поверхности алмазных порошков / Ю.И. Никитин, Г.А. Петасюк // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 1. – С. 77-93.
7. Спиридонова, І.М. Вплив фосфору на структуру та властивості гемібориду заліза в сплавах Fe-B-P. / І.М. Спиридонова, О.В. Сухова, Н.В. Карпенко // Порошковая металлургия. –2009. Т. 48, № 11-12 (470). – С. 119–124.
8. Сухова О.В. Влияние фосфора и молибдена на структуру и свойства сплавов Fe-C-B. / О.В. Сухова, Н.В. Карпенко, Ю.В. Сироватко // Вісник ДНУ. Серія: Фізика і радіоелектроніка. –2010. – Вип. 17. – Т. 18, № 2. – С. 27-33.