УДК 621.325:669.539.43

І. М. Журавель

МОДЕЛЮВАННЯ ЗЕРЕННОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ДІАГРАМ ВОРОНОГО

The paper describes grain structure modeling of metallographic images using Voronoi diagrams. A comparative analysis of real and simulated images using fractal dimension and the average diameter of the grains. This approach is a promising tool for the analysis of the grain microstructure of metals.

Keywords: *metal microstructure, grain, modeling, Voronoi diagram.*

Розглянуто моделювання зеренної структури металографічних зображень за допомогою діаграм Вороного. Проведено порівняльний аналіз вихідних та змодельованих зображень із використанням фрактальних розмірностей та усередненого діаметра зерен. Цей підхід є перспективним інструментом для аналізу зеренної мікроструктури металів.

Ключові слова: *мікроструктура металу, зерна, моделювання, діаграми Вороного*.

Одним із основних напрямків розвитку сучасного матеріалознавства є розробка нових металів та сплавів із заданими фізико-механічними властивостями. При цьому важливим є розвиток методів мікроструктурного аналізу, які дають можливість пов'язати механічні, фізичні та хімічні властивості матеріалу з відповідними змінами у його зеренній структурі. У більшості випадків об'єктом досліджень є металографічні та фрактографічні зображення зрізу чи зламу металу, які отримані на оптичному чи електронному мікроскопі. Проте для виявлення певних залежностей між фізико-механічними властивостями та мікроструктурою необхідним є модельне представлення зеренної структури металу.

Одним із найбільш вживаних підходів до моделювання зеренної мікроструктури є метод Монте–Карло [1]. Цей підхід до моделювання дає можливість врахувати початковий текстурний стан матеріалу, а також вплив локального зерномежового розорієнтування кристалічної ґратки на рухливість міжзеренної межі. Проте цей підхід не є найкращим для вивчення метричних та орієнтаційних співвідношень, які характеризують зеренну структуру металу.

Останнім часом у процесі металографічних та фрактографічних досліджень активно використовують технології обробки зображень. Аналіз таких зображень здебільшого зводиться до обчислення геометричних розмірів певних структурних складових [2, 3]. При дослідженні, беручи до уваги кристалічну структуру металів, доволі часто зерна представляють у вигляді багатокутників. Така модель дає змогу повніше оцінити метричні та топологічні властивості зеренної структури. Припустимо, що точки p_i є центрами кристалізації і на рис. 1 зображені у вигляді зерен кристалу, які ростуть з постійною швидкістю у всіх напрямках. Також припускаємо, що ріст зерен кристалу продовжується доти, поки два чи більше зерна не зустрінуться. Через деякий час зерно, яке виросло, буде представлено коміркою

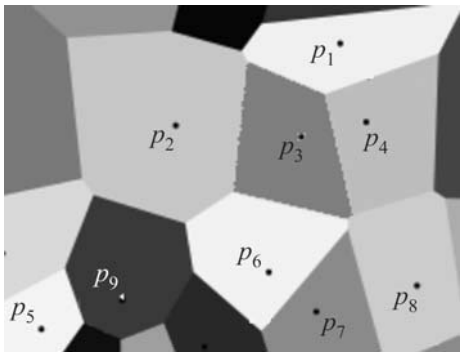


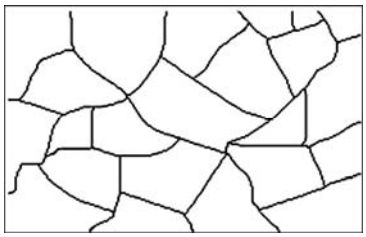
Рис. 1. Діаграма Вороного з вершинами p_i, де $i = 1 \div 9$.

© І. М. Журавель, 2014

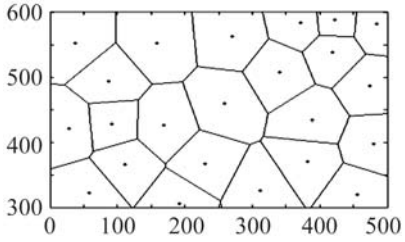
діаграми Вороного. В результаті буде отримана діаграма Вороного для множини точок p_i. Тому розглянемо використання діаграм Вороного для моделювання меж зерен на металографічному зображенні металу. Марка металу в цьому випадку не має принципового значення.

Наведемо означення діаграм Вороного. У найпростішому випадку ми маємо множину точок площини p_i, які називають вершинами діаграми Вороного. Кожній вершині p_i належить комірка Вороного, утворена з усіх точок, ближчих до p_i, ніж до будь-якої іншої вершини. Границі на діаграмі Вороного являють собою всі точки на площині, які рівновіддалені від двох найближчих вершин. Вузли Вороного – точки, рівновіддалені від трьох і більше вершин [4].

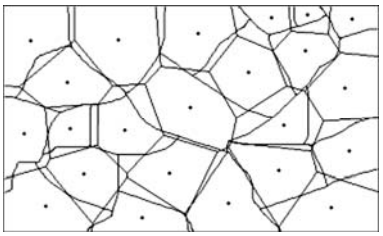
На рис. 2 наведені результати моделювання меж зерен металу з використанням діаграм Вороного. За вхідне використано зображення меж зерен деякого металу. Підходи до формування таких даних детально описані у роботі [1].



а – зображення меж зерен металу.



б – зображення меж зерен металу, яке змодельоване з використанням діаграм Вороного.



в – зображення меж зерен матеріалу з накладеними на нього діаграмами Вороного.

Рис. 2. Результати моделювання меж зерен металу з використанням діаграм Вороного.

З наведених на рис. 2 результатів видно, що діаграми Вороного не збігаються з межами зерен. Це пояснюється тим, що наші припущення про збіжність центрів кристалізації зерен p_i з центрами мас їх двовимірних зображень та про ріст зерен кристалу у всіх напрямках з однаковою швидкістю є наближеними.

Для кількісної оцінки відповідності між зображеннями меж зерен (рис. 3*а*, *в*, *ґ*, *е*, *ж*, *и*, *ї*, *к*) та їх модельним поданням (рис. 3*б*, *г*, *д*, *є*, *з*, *і*, *й*, *л*) за допомогою діаграм Вороного використовували фрактальну розмірність. За вхідні взято серію тестових зображень (рис. 3) меж зерен різного розміру з ГОСТ 5639-82 [5]. Для кожного із цих зображень було сформовано відповідне зображення меж зерен за допомогою діаграм Вороного (рис. 3).

Далі для кожного із зображень набору були обчислені фрактальні розмірності. Оскільки зображення меж зерен металу є бінарними, то при проведенні цих обчислень було використано клітинний метод [6]. Результати проведених обчислень свідчать, що максимальна відносна похибка фрактальної оцінки зображень меж зерен певного розміру та відповідних до них змодельованих зображення (рис. 3) становить 1,15%.

Проведено аналогічні дослідження з визначення усередненого діаметра зерен для тестових зображеннях (ГОСТ 5639-82) та відповідних їм моделей, отриманих за допомогою діаграм Вороного (рис. 3). При обрахунках застосовували

метод автоматизованого визначення геометрії зерен [7], в основу якого покладено ГОСТ 5639-82 [5]. Результати проведених обчислень наведені на рис. 4.

Тестові зображення та їх модельне представлення

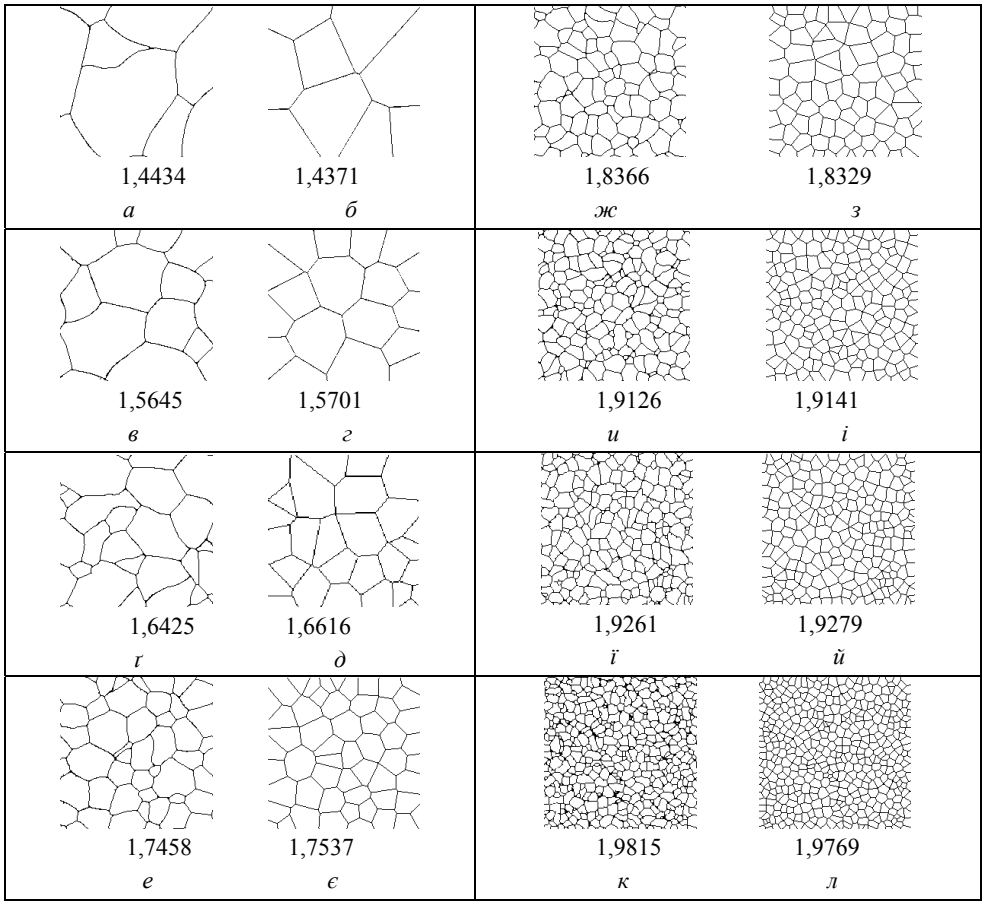


Рис. 3. Фрактальні розмірності серії тестових зображень меж зерен різного розміру (ГОСТ 5639-82) та відповідних їм моделей, отриманих за допомогою діаграм Вороного.

З рис. 4 видно, що усереднені діаметри зерен металу на тестових зображеннях, які були взяті з ГОСТ 5639-82, та на зображеннях, отриманих за допомогою діаграм Вороного, є приблизно однаковими. Максимальне відносне відхилення усередненого діаметра зерна, змодельованого за допомогою діаграм Вороного, становить 5,7%. На підставі проведених досліджень можна стверджувати, що запропонована модель є адекватною.

Моделювання меж зерен металу за допомогою діаграм Воронова надає нові можливості щодо аналізу зеренної структури металів. Зокрема, таке подання зеренної структури дає змогу до-

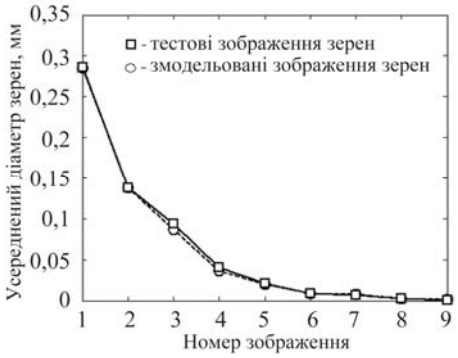


Рис. 4. Графіки усереднених діаметрів зерен металу, обчислені за тестовими зображеннями (ГОСТ 5639-82) та відповідними їм модельними представленнями за допомогою діаграм Вороного.

слідити геометричні та статистичні співвідношення багатокутників на діаграмах Воронова, які тісно пов'язані з характеристиками зеренної мікроструктури та матеріалу [8]. Актуальними також є дослідження в напрямку підвищення точності моделювання зеренної структури. Для цього необхідно оптимізувати вибір вузлів на діаграмах Вороного, які є центрами кристалізації зерен металу.

1. *Трехмерное* компьютерное моделирование методом Монте–Карло эволюции текстуры и роста зерен при отжиге / O. M. Ivasishin, S. V. Shevchenko, N. L. Vasiliev, S. L. Semiatin // Металлофизика и новейшие технологии. – 2001. – **23**, № 12. – С. 1569–1587.
2. *Автоматизоване* визначення геометрії зерен в експлуатованій паропровідній сталі / І. М. Журавель, Л. М. Свірська, О. З. Студент та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 3. – С. 23–29.
3. *Автоматичне* виділення та кількісний аналіз карбідів на межах зерен сталі 12Х1МФ після експлуатації на парогоні ТЕС / Р. А. Воробель, І. М. Журавель, Л. М. Свірська, О. З. Студент // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – № 3. – С. 109–115.
4. *Березовський К. А.*. Дослідження паралельного алгоритму побудови діаграми Вороного на площині // Проблеми програмування. – 2009. – № 1. – С. 28–35.
5. *ГОСТ 5639-82.* Сталі та сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна.
6. *Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И.* Фракталы в материаловедении: Уч. для студентов высших технических учебных заведений / Под ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск: ПГАСА, 2005 – 253 с.
7. *Автоматизоване* визначення геометрії зерен в експлуатованій паропровідній сталі / І. М. Журавель, Л. М. Свірська, О. З. Студент та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 3. – С. 23–29.
8. *Кириченко В. Г., Коваленко О. В., Леонов В. Н.* Фактори розподілу та росту зерен в полікристалічних 3D та 2D структурах // J. Kharkiv University. – 2012. – № 991. – С. 75–79.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Одержано 28.03.2014