

В. Мельник, В. Соколов\*, Д. Юрковец\*

Волинский государственный университет им. Л. Украинки, м. Луцк, Украина

\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, м. Москва, Россия

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СКЕЛЕТНОГО КОМПОНЕНТА МИКРОСТРУКТУРЫ ПО РЭМ-ИЗОБРАЖЕНИЯМ

© Мельник В., Соколов В., Юрковец Д., 2005

*Описываются новый метод и реализующее его программное обеспечение для морфологического анализа скелетного компонента по РЭМ-изображениям. Метод основан на использовании дискретных программ Вороного, с помощью которых осуществляется корректное разделение соприкасающихся структурных элементов. Полученные экспериментальные данные подтверждают высокую эффективность предлагаемого метода при проведении морфологического анализа поверхностной микроструктуры в РЭМ.*

*The method and corresponding software aimed to carry out morphological analysis of structure skeleton by SEM images are described. The method implies discrete Voronoi diagram utilization. These diagrams enable to separate contacting structural elements. The obtained experimental data confirm the efficiency of the method suggested for morphological analysis of solids surface microstructure in SEM.*

**Постановка проблемы.** Выделение скелетного (твердого) компонента структуры микрообъектов в растровой электронной микроскопии (РЭМ) является одной из наиболее сложных и актуальных задач морфологического анализа (Салтыков С.А., 1970, Чернявский К.С., 1977). Основная проблема связана с неоднозначностью, а в большинстве случаев и невозможностью выбора оптимального уровня дискриминации, при котором твердые структурные элементы могли бы быть выделены на полутоновом изображении с минимальными искажениями их размеров и формы (Соколов В.Н., Мельник В.Н. и др., 1998). Наибольшую сложность при этом представляют группы близко расположенных друг к другу структурных элементов, выделение которых неустойчиво по отношению к параметрам бинаризации. Вследствие этого при автоматическом морфологическом анализе такие группы структурных элементов могут восприниматься как один структурный элемент. Это приводит к искажению результатов анализа – завышению числа крупных объектов и занижению числа более мелких.

В связи с изложенным особую актуальность приобретает задача корректного разделения конгломератов структурных элементов на составляющие. К сожалению, очевидный подход, связанный с применением суперпозиции базовых методов математической морфологии, таких как дилатация, эрозия и другие не решают данной проблемы (Serra J., 1982).

**Решение проблемы.** Авторами разработан алгоритм и программное обеспечение, основанные на использовании дискретных диаграмм Вороного для граничных точек структурных элементов (Brandt J.W., Algari V.R., 1992; Ogniewicz R.L., 1992; Voronoi G.M., 1908). Предлагаемый метод позволяет с высокой точностью и надежностью выделять центральные оси твердых структурных элементов. При этом в непрерывном случае центральные оси Вороного трактуются как множества центров всех возможных окружностей максимального радиуса, вписанных в разделяемую на составляющие фигуру.

Формально центральная дискретная ось Вороного (ЦДОВ) определяется как диаграмма Вороного первого порядка для граничных точек в пересечении с образующей областью  $S$ :

$$DVMA(B(S)) = Vor_1^{\Delta}(B(S)) \cap S, \quad (1)$$

где  $DVMA$  – ЦДОВ,  $B(S)$  – граница плоской фигуры;  $S$  – может состоять из нескольких составляющих;  $VOR_1(B(S))$  – диаграмма Вороного первого порядка для граничных точек  $S$ .

Знаком  $\overset{\Delta}{=}$  обозначены равенства по определению.

В свою очередь, диаграмма Вороного первого порядка определяется следующим образом:

$$Vor_1^{\Delta}(B(S)) = \bigcup_{p_i \in B(S)} V(p_i), \quad (2)$$

где  $p_i$  – точки границы;  $V(p_i)$  – геометрическое место всех точек, лежащих ближе к  $p_i$ , чем к любой другой точке из множества:

$$V(p_i) = \bigcap_{i \neq j, p_i, p_j \in B(S)} H(p_i, p_j), \quad (3)$$

где  $H(p_i, p_j)$  – полуплоскость, содержащая точки из  $B(S)$ , лежащие ближе к  $p_i$ , чем к  $p_j$ . Данная полуплоскость включает в себя  $p_i$ , и ограничена прямой, ортогональной отрезку  $p_i p_j$  и делящей его пополам.

Таким образом, как видно из определений, ЦДОВ представляет собой плоский граф, каждое ребро которого порождено парой граничных точек.

Для того, чтобы уменьшить влияние мелких деталей границы разделяемого объекта на форму ЦДОВ, применяется специальная процедура регуляризации полученного графа с использованием весовых функций оценки остаточной разности. В качестве весовых функций остаточной разности рассматриваются: функция потенциальной разности; функция круговой разности; функция двойной круговой разности; функции хордовой разности. Весовые функции ставят в соответствие каждому ребру из диаграммы Вороного значения величин информативности, по которым проводится упорядочивание ветвей графа и устранение влияния несущественных деталей.

Рассмотрим более подробно перечисленные весовые функции.

Функция потенциальной разности – наиболее простая из рассматриваемых. Значением этой функции является величина потенциальной разности  $\Delta R_p(e)$ , равная кратчайшему расстоянию между парами точек, породившими ребро  $e$ . Расстояние вычисляется вдоль границы фигуры (рис. 1, а). Если граница фигуры сложная и точки принадлежат разным границам, то разность потенциалов полагается равной  $\infty$ . Тогда величина потенциальной разности вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta R_p(e_{p_A p_B}) &\overset{\Delta}{=} w_{AB}; \\ B(S) = B_1(S) \cup B_2(S) &\Rightarrow \Delta R_p(e_{p_A F_c}) = \infty; \\ B(S) = B_1(S) \cup B_2(S) &\Rightarrow \Delta R_p(e_{p_H p_c}) = \infty. \end{aligned} \quad (4)$$

Функция круговой разности принимает значения  $\Delta R_C(e)$ , характеризующие соотношения расстояний между двумя точками, порождающими ребро  $e$  с длиной дуги, соединяющей эти точки  $b_{AB}$  (рис. 1, б). Формальное определение этой функции имеет следующий вид:

$$\Delta R_C(e_{p_A p_B}) \overset{\Delta}{=} w_{AB} - b_{AB} = \Delta R_p(e_{p_A p_B}) - b_{AB}. \quad (5)$$

Таким образом, легко заметить, что значение  $\Delta R_C(e)$  может быть интерпретировано как степень аппроксимации участка границы, вписанной в фигуру окружности максимального радиуса  $r$ .

Функция двойной круговой разности является модификацией описанной выше круговой функции. Данная функция используется при исследовании фигуры с округлыми границами. Она определяется следующим образом:

$$\Delta R_B(e_{P_A P_B}) \overset{\Delta}{=} \frac{2}{\pi} (w^*_{AB} - b_{AB}) = w_{AB} - \frac{2}{\pi} b_{AB} = \Delta R_P(e_{P_A P_B}) - \frac{2}{\pi} b_{AB}, \quad (6)$$

где

$$w^*_{AB} = \frac{2}{\pi} w_{AB}.$$

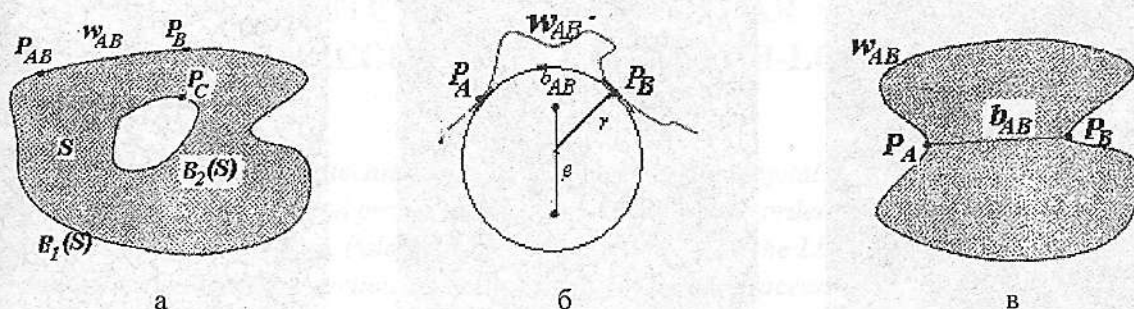


Рис. 1. Весовые функции потенциальной разности (а), круговой разности (б), хордовой разности (в)

Функция хордовой разности ставит в соответствие ребру  $e$  значение  $\Delta R_H(e)$ , полученное как разность расстояния между двумя точками, порождающими ребро  $e$ , и длины хорды, соединяющей эти точки (рис. 1, в):

$$\Delta R_H(e_{P_A P_B}) \overset{\Delta}{=} w_{AB} - h_{AB} = \Delta R_P(e_{P_A P_B}) - h_{AB}. \quad (8)$$

Выбор той или иной весовой функции осуществляется в зависимости от величины сложности результирующего графа: предпочтение отдается функциям, для которых сложность результирующего графа минимальна.

Регуляризованный граф ЦДОВ носит название дискретного скелета Вороного и является подмножеством ЦДОВ:

$$S_{kc}^{DVMA}(B(S)) \subseteq DVMA(B(S)). \quad (9)$$

Окончательный вид центральные оси объекта принимают после разбиения дискретного скелета Вороного на иерархические группы. Элементы скелета Вороного, представляющие верхний уровень иерархии, являются главными центральными осями объекта.

Процесс разделения объектов основывается на анализе главных центральных осей, полученных описанным выше способом. Основная идея алгоритма разделения – поиск локальных минимумов диаметров, вписанных в объект окружностей, центры которых расположены вдоль главных центральных осей. Поиск локальных минимумов осуществляется от центральной части найденных графов к периферии.

**Результаты экспериментальных исследований.** На рис. 2, а представлено РЭМ-изображение образца керамики. В результате бинаризации было получено новое изображение, представленное на рис. 2, б. На основании морфологического анализа полученного бинарного изображения была построена гистограмма распределения частиц по эквивалентным диаметрам, показанная на рис. 3, а. С помощью описанного метода ЦДОВ бинарное изображение было подвергнуто операции

разделения. Результатом явилось бинарное изображение, представленное на рис. 2, в. Гистограмма распределения частиц по эквивалентным диаметрам для этого изображения приведена на рис. 3, б. Как видно из представленных гистограмм, благодаря операции разделения произошло изменение распределения структурных элементов за счет уменьшения количества крупных (неразделенных) элементов и появления более мелких частиц. Полученные данные подтверждаются результатами гранулометрического анализа, проведенного по стандартной методике, а также морфологическим анализом тестовых образцов, сложенных частицами известного размера.

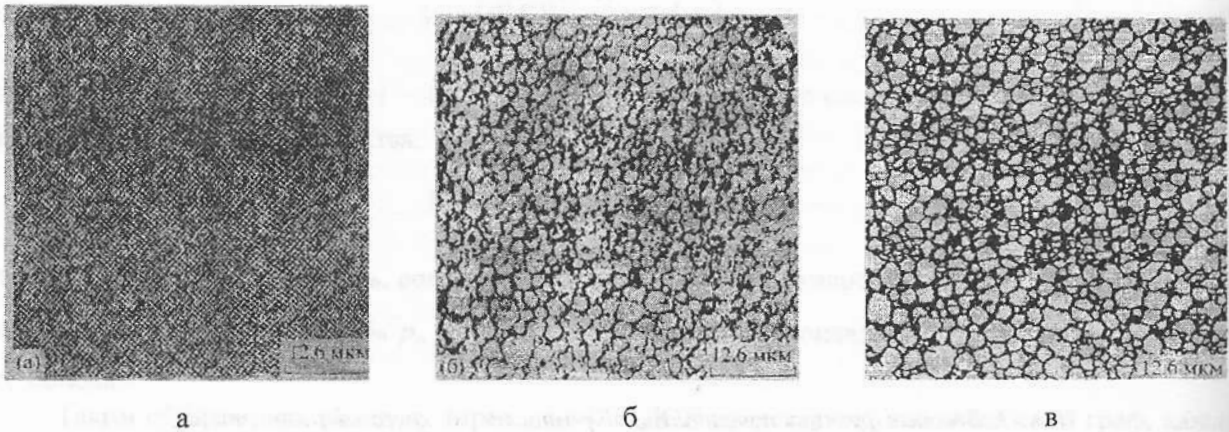


Рис. 2. Результат обработки РЭМ-изображений образца керамики (увеличение  $\times 1000$ ): исходное изображение (а); бинаризованное изображение (б); результат разделения частиц (в).

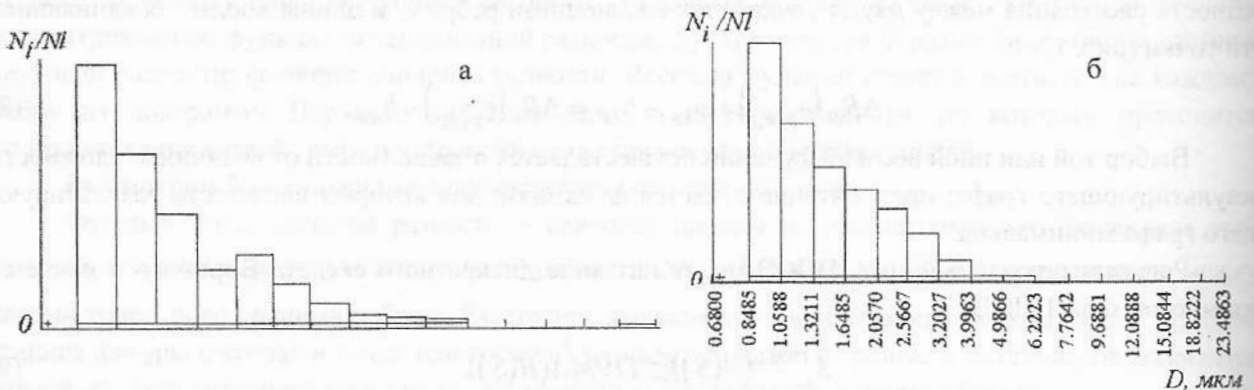


Рис. 3. Гистограммы распределения частиц по эквивалентным диаметрам  $D$ : без выполнения операции разделения (а); после выполнения операции разделения (б);  $N_i / N_l$  – плотность вероятности (в)

**Выводы.** Описанный в работе алгоритм математически корректен и может быть положен в основу одного из модулей пакета программ для количественного морфологического анализа микроструктуры «STIMAN» (МГУ). В результате функциональные возможности данного модуля будут существенно расширены и позволят более полно изучать полидисперсные структуры и адекватно описывать морфологические особенности скелетной компоненты изучаемых образцов.

1. Салтыков С.А. *Стереометрическая металлография*. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.  
 2. Соколов В.Н., Юковец Д.И., Разгулина О.В., Мельник В.Н. // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед.* – 1998. – № 1. – С. 33.  
 3. Чернявский К.С. *Стереология в металловедении*. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.  
 4. Brandt J.W., Algazi V.R. // *Computer Vision, Graphics and Image*

*Processing. – 1992. – 55(3). – P. 329.* 5. *Ogniewicz R.L. Discrete Voronoi Skeletons. – Zurich, 1992. – P. 208.* 6. *Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. – London: Academic Press, 1982. – 610 p.* 7. *Voronoi G.M. // Z. Reine Angew, Math. – 1908. – B. 134. – C. 198.*