



The description of mathematical apparatus, algorithms and software AOM-1 and AOM-2, used for computer processing and quantitative analysis of microstructures of pearlitic steels and grey irons, is given.

А. Н. ЧИЧКО, О. А. САЧЕК, С. Г. ЛИХОУЗОВ, В. Ф. СОБОЛЕВ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 519.6: 621.74

## МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФОРМАЛИЗМ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Развитие компьютерных технологий, связанных с обработкой изображений микроструктур сплавов, открывает новые возможности для исследования материалов [1]. Математическая формализация микроструктур сплавов создает основу для развития новых количественных методов анализа микроструктур сплавов, что позволяет повысить точность методов исследования взаимосвязей типа «микроструктура – свойства».

Целью настоящей работы является описание математического аппарата и программного обеспечения для обработки изображений микроструктур железоуглеродистых сплавов, позволяющего проводить количественную оценку микроструктурных составляющих.

Авторами настоящей работы развивается научное направление, связанное с разработкой программного обеспечения для анализа микроструктур промышленных сплавов.

Программное обеспечение АОМ-1 для обработки микроструктур перлитных сталей [2, 3]

В основе программного обеспечения АОМ-1 реализованы:

- алгоритм бинаризации изображений микроструктуры перлитной стали;
- алгоритм обработки изображений перлитной стали для определения множества межпластиночных расстояний микроструктур  $\Omega = \{d_{ij}^{пл} \in R\}$  по формуле

$$d_{ij}^{пл} = \frac{(d_1 + d_2)(d_3 + d_4)}{\sqrt{(d_1 + d_2)^2 + (d_3 + d_4)^2}},$$

где  $d_k, k = 1, 4$  – группа плоскостных расстояний между ферритом и цементитом;

- алгоритм определения функции  $H(d_{пл})$  плотности распределения и нормированной функции  $H_P(d_{пл})$  межпластиночных расстояний.

В качестве характеристик для параметризации микроструктур перлитной стали на основе рассчитанной функции распределения  $H_P(d_{пл})$  предлагаются следующие параметры:

- параметр  $P_1$ , характеризующий среднее видимое межпластиночное расстояние образца, определяемый по формуле:

$$P_1 = \sum_{k=1}^q H_P(d_{пл}^k) d_{пл}^k$$

где  $q$  – число интервалов дискретизации значений межпластиночных расстояний;

- параметр  $P_2$ , характеризующий истинное межпластиночное расстояние микроструктур образца  $d_{пл}^{ист}$ , определяемый как:

$$d_{пл}^{ист} = \begin{cases} \frac{d_{пл}^k - d_{пл}^1}{n} s_1, & \text{если } H(d_{пл}^{k-1}) > H(d_{пл}^{k+1}), \\ \frac{d_{пл}^k + d_{пл}^1}{n} s_2, & \text{если } H(d_{пл}^{k-1}) \leq H(d_{пл}^{k+1}), \end{cases}$$

где  $H(d_{пл}^k) = \max\{H(d_{пл})\}$ ;  $s_1$  и  $s_2$  – смещения преобладающего расстояния относительно максимума ненормированной функции распределения;

- параметр  $P_3$ , характеризующий долю цементитных пластин образца микроструктуры;
- параметры  $P_4 - P_{13}$ , характеризующие доли видимых межпластиночных расстояний микроструктуры в диапазоне  $(0; s_i)$ , где  $s_i = 0,04; 0,08; 0,12; 0,16; 0,20; 0,24; 0,32; 0,48; 0,64; 1,04, i = 4, 13$ ,

вычисляемые по формуле  $P_i = \sum_{k=1}^{t_i} H_P(d_{пл}^k), t_i = 1,$

2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 16, 26;

- параметры  $P_{14}, P_{15}$ , характеризующие минимальные видимые межпластиночные расстояния

среди соответственно 10- и 20%-ных максимальных расстояний микроструктуры, равные значениям  $d_s^z$  и  $d_s^y$ , которые являются  $z$ -м и  $y$ -м членами отсортированного ряда расстояний  $D_n = d_s^1, d_s^2, \dots, d_s^n$ ;

$$z = 0,9n; y = 0,8n; n = \sum_{l=1}^q H(d_{пл}^l);$$

- параметры  $P_{16}, P_{17}$ , характеризующие средние видимые межпластиночные расстояния среди 10- и 20%-ных максимальных расстояний микроструктуры, вычисляемые по формулам:

$$P_{16} = \frac{\sum_{l=y}^n d_s^l}{0,1n}$$

и

$$P_{17} = \frac{\sum_{l=y}^n d_s^l}{0,2n};$$

- параметры  $P_{18}, P_{19}$ , характеризующие максимальное значение функции распределения и межпластиночное расстояние, соответствующее этому значению;

- параметр  $P_{20}$ , характеризующий площадь окрестности пика функции распределения расстояний  $H_P(d_{пл})$ , определяемый по формуле:

$$P_{20} = \frac{d_1^{P_{19}+1}}{d_1^{P_{19}-1}} \int_{d_1^{P_{19}-1}} H_P(d_{пл}) dd_{пл}.$$

*Программное обеспечение АОМ-2 сч для обработки микроструктур серых чугунов*

В основе развиваемого компьютерного метода положен алгоритм, позволяющий по изображению микроструктуры определить статистическое распределение графитной фазы в серых чугунах. Основными этапами алгоритма являются бинаризация изображения с использованием адаптивного порога, сегментация изображения для выделения включений графита, обработка графитных включений с вычислением их площадей, периметров и расстояний между ними, определение функции статистического распределения перечисленных параметров.

Алгоритм определения характеристик графитных включений состоит из следующих этапов.

*Этап 1.* Формирование исходного множества  $\Omega^0$  на основе изображения микроструктуры серого чугуна:

$$\Omega^0 = \{N_{ij}^0 \in N\},$$

где  $N_{ij}^0$  – значение яркости цветного изображения в точке с координатами  $(i, j)$ ;  $i$  и  $j$  – индексы двумерного пространства в интервалах  $1 \leq i \leq L_x,$

$1 \leq j \leq L_y; L_x, L_y$  – размеры изображения в пикселях по осям координат  $X$  и  $Y$  соответственно.

*Этап 2.* Создание полутонового изображения при помощи функций пороговой обработки микроструктуры (множество  $\Omega^1 = \{N_{ij}^1 \in R | 0 \leq N_{ij}^1 \leq 1\}$ ):

$$N_{ij}^1 = \frac{N_{ij}^0}{\max\{N_{ij}^0\}}.$$

*Этап 3.* Построение вектора длиной  $m$  из бинаризованных изображений  $\Omega^2 = \{\Omega_1^2, \Omega_2^2, \dots, \Omega_m^2\}$ , где  $\Omega_k^2 = \{N_{ijk}^2\}, k = 1, m$  с помощью преобразования

$$N_{ijk}^2 = \begin{cases} -1, & \text{если } N_{ij}^1 \leq \beta_k, \\ 1, & \text{если } N_{ij}^1 > \beta_k, \end{cases}$$

где  $\beta_k \in \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$  – порог бинаризации.

*Этап 4.* Создание бинаризованного изображения микроструктуры из полученного вектора  $\Omega^3 = \{N_{ij}^3 | N_{ij}^3 = 0 \text{ или } N_{ij}^3 = 1\} = \Omega_l^2$ , где  $l$  – индекс вектора параметров  $\alpha$ , для которого выполняется условие:

$$\mu - \frac{\varepsilon}{2} < \alpha_l < \mu + \frac{\varepsilon}{2},$$

где  $\alpha_k = \frac{\sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} t_{ij}^k}{L_x L_y - \sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} t_{ij}^k}; t_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } N_{ijk}^2 = -1, \\ 0, & \text{если } N_{ijk}^2 = 1, \end{cases}$

$k = 1, m; \mu$  – заданное значение;  $\varepsilon$  – отклонение  $\mu$ .

*Этап 5.* Формирование множества  $\Omega^4 = \{N_{ij}^4 \in N\}$  маркированных пятен (графитных включений), где  $N_{ij}^4$  – номер пятна, которому принадлежит точка с координатами  $(i, j)$ .

В процессе формирования множества  $\Omega^4$  производится распознавание несвязных структур (графитных включений) путем создания множества  $Q = \{q_i | i = 1, k\}$ , где  $k$  – число несвязных структур, которое увеличивается в процессе распознавания изображения. Формирование множества  $\Omega^4$  происходит последовательно для каждой точки  $(i, j)$  при выполнении одного из следующих условий:

если  $N_{ij}^3 = 0$ , то  $N_{ij}^4 = 0$ ;

если  $N_{ij}^3 = 1$ , то  $N_{ij}^4$  может принимать значения исходя из следующих условий:

а) если

$$\begin{cases} N_{i-1,j}^4 = q_a, & \cup & \begin{cases} N_{i,j-1}^4 = q_b, \\ N_{i-1,j}^3 = 1, & \cup & \begin{cases} N_{i,j-1}^3 = 1, \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

где  $q_a, q_b \in Q; a, b \in [1, k]$ , тогда

$$N_{ij}^4 = \min\{q_a, q_b\};$$

б) если  $\begin{cases} N_{i-1,j}^4 = q_a, \\ N_{i-1,j}^3 = 1, \end{cases} \cup \begin{cases} N_{i,j-1}^4 = q_b, \\ N_{i,j-1}^3 = 0, \end{cases}$

тогда  $N_{ij}^4 = q_a$ ;

в) если  $\begin{cases} N_{i-1,j}^4 = 0, \\ N_{i-1,j}^3 = 0, \end{cases} \cup \begin{cases} N_{i,j-1}^4 = q_b, \\ N_{i,j-1}^3 = 1, \end{cases}$

тогда  $N_{ij}^4 = q_b$ ;

г) если  $\begin{cases} N_{i-1,j}^4 = 0, \\ N_{i-1,j}^3 = 0, \end{cases} \cup \begin{cases} N_{i,j-1}^4 = 0, \\ N_{i,j-1}^3 = 0, \end{cases}$

тогда  $k = k + 1$ ;  $N_{ij}^4 = k$ .

**Этап 6.** Определение вектора  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$  площадей пятен (графитных включений) путем последовательного выполнения следующей операции для всех точек с координатами  $(i, j)$

$$s_{N_{ij}^4} = s_{N_{ij}^4} + 1.$$

**Этап 7.** Определение вектора  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$  периметров пятен (графитных включений) путем последовательного выполнения следующей операции для всех точек с координатами  $(i, j)$ : если  $N_{i-1,j}^4 = 0 \cup N_{i+1,j}^4 = 0 \cup N_{i,j-1}^4 = 0 \cup N_{i,j+1}^4 = 0$ , тогда  $p_{N_{ij}^4} = p_{N_{ij}^4} + 1$ .

**Этап 8.** Определение вектора  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$  расстояний между пятнами (графитными включениями) путем последовательного выполнения следующей операции:

если выполняются условия

$$\begin{cases} N_{i+1,j}^3 = 0, \\ N_{i,j}^3 = 1, \end{cases} \cup \begin{cases} N_{i+k,j}^3 = 0, \\ N_{i+k+1,j}^3 = 1, \end{cases} \text{ тогда } r_k = r_k + 1.$$

**Этап 9.** Построение функций распределения значений площадей, периметров пятен и расстояний между ними  $H_s(s)$ ,  $H_p(p)$ ,  $H_r(r)$  с шагами дискретизации значений  $\Delta q_s$ ,  $\Delta q_p$ ,  $\Delta q_r$ .

Программа АОМ-2 сч для железоуглеродистых сплавов, имеющих в микроструктуре графит, позволяет определять статистические функции плотности распределения значений параметров микроструктуры: площадь, периметр, ширину включений графита, отношение периметра к площади включений, расстояния между включениями, отношение расстояния между включениями графита к ширине включений; проводить обработку как отдельного изображения микроструктуры, так и группы изображений микроструктур; определять интегральные характеристики для группы изображений микроструктур; экспортировать числовую информацию статистической функции плотности распределения в Microsoft Excel.

### Литература

1. Лихоузов С. Г., Сачек О. А., Чичко А. Н. О методах компьютерной обработки микроструктур сталей с различной дисперсностью перлита // Информатика и системы управления. 2010. № 1. С. 19–29.
2. Свидетельство о регистрации программного обеспечения АОМ-1: А. с. 085, 16.06.09 / А. Н. Чичко, О. А. Сачек, С. Г. Лихоузов, А. В. Веденеев, Е. П. Барадынцева, В. Ф. Соболев; Белор. нац. техн. ун-т. № С20090028.
3. Чичко А. Н., Сачек О. А., Лихоузов С. Г. Методы автоматизации обработки изображений микроструктур перлитных сталей // Информационные технологии. 2010. № 7. С. 71–77.