



The mathematical apparatus and algorithms for processing of the ingot macrostructure image, which allow to estimate quantitatively the ingot defects, are presented.

А.Н. ЧИЧКО, О.А. САЧЕК, БНТУ

УДК 669.27:519

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МАКРОСТРУКТУРЫ СЛИТКА ДЛЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Одним из важнейших технологических процессов изготовления промышленных заготовок является технология разлива стали в слитки. Эта технология реализуется в так называемых машинах непрерывной разлива стали (МНЛЗ) [1, 2]. При использовании данной технологии необходимо, чтобы механические свойства заготовки имели требуемый уровень в соответствии с требованиями заказчика. При этом уровень макроструктуры заготовки должен удовлетворять требованиям заказчика или методикам ГОСТ, которые ориентированы, как правило, не на количественный уровень, а на качественный в виде различных шкал. Так, при исследовании макроструктуры слитка определяют следующие характеристики: осевую ликвацию, ликвационные полосы и трещины, краевое точечное загрязнение, подкорковые пузыри, раздутие граней, ромбичность с использованием ОСТ 14-1-235-91 и ГОСТ 10243. Одним из недостатков оценки перечисленных выше дефектов является то, что они определяются с помощью качественной шкалы, которая часто не позволяет сравнивать между собой результаты различных промышленных испытаний, проводимых на МНЛЗ. Как показывает опыт работы РУП «БМЗ», осевая ликвация часто в основном принимает значения 2-го и 3-го балла, что затрудняет выбор наилучших технологических режимов и их дальнейшую оптимизацию. Это касается практически всех характеристик оценки макроструктуры слитка. Кроме того, по всем перечисленным выше характеристикам необходимо выделять наиболее значимые каждой из них, что представляет собой сложную задачу. Исследования, связанные с обработкой изображений микроструктуры [3, 4], показывают, что компьютерные методы позволяют повысить информативность методик оценки микроструктуры, переводя

их с качественного на количественный уровень. При этом снижается время обработки структур, с одной стороны, и повышается точность рассчитываемых данных с другой. Поэтому представляет научно-практический интерес разработка методик для комплексной оценки макроструктуры слитка по изображению темплетов в световом микроскопе.

Целью настоящей статьи является разработка методик и алгоритмов, позволяющих на количественном уровне с помощью комплексного критерия оценивать макроструктуру светового изображения слитка.

Традиционно оценка макроструктуры заготовок на предприятии РУП «БМЗ» производится по темплетам, один из которых показан на рис. 1.

В качестве компьютерного метода количественной оценки макроструктуры заготовок (поперечное и продольное сечения слитка) предлагается метод, алгоритм которого включает следующие шаги.

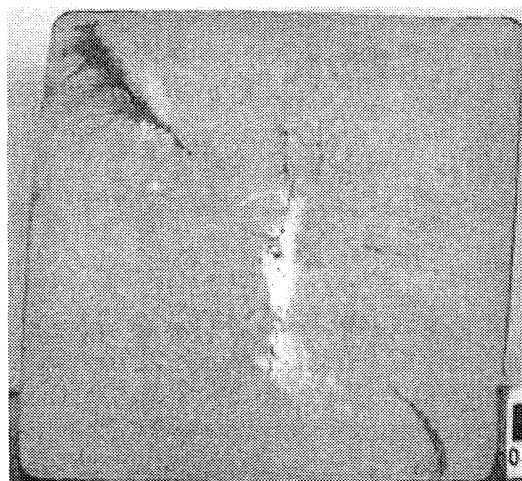


Рис. 1. Пример изображения темплета, используемого для оценки качества макроструктуры заготовок (данные РУП «БМЗ»)

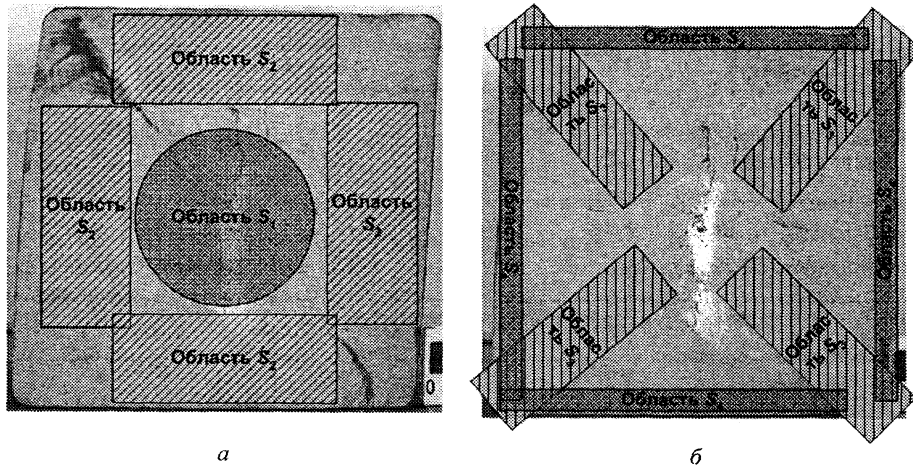


Рис. 2. Правила выделения областей для компьютерной обработки

Т а б л и ц а 1. Параметры для области S₁ (центральная область темплета)

Параметр	Описание параметра	Формулы для расчета параметра
P_1^1	Характеризует общую площадь дефекта области	$P_1^1 = \sum_{i=1}^{i_2} \sum_{j=1}^{j_2} N_{ij}^3$, где $N_{ij}^3 \in \Omega^3$, $N_{ij}^3 = 1$
P_2^1	Характеризует максимальную толщину пятен дефекта области	$P_2^1 = \frac{\sum_{l=1}^n d_s^l}{0,1n}$, где d_s^z – z-ый член последовательности $D_n = d_s^1, d_s^2, \dots, d_s^n$, которая отсортирована по толщинам пятен дефекта; $z = 0,9n$; $n = \sum_{l=1}^q Q(w_p^l)$
P_3^1	Характеризует среднюю толщину пятен дефекта области	$P_3^1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^q Q(w_p^k) w_p^k$
P_1	Интегральный критерий области	$P_1 = \sum_{i=1}^3 k_i^1 P_i^1$, k_i^1 – весовой коэффициент значимости для критерия P_i^1 , $i = 1, 3$

Т а б л и ц а 2. Параметры для области S₂ (основная область темплета)

Параметр	Описание параметра	Формулы для расчета параметра
P_1^2	Характеризует общую площадь дефекта области	$P_1^2 = \sum_{i=1}^{i_2} \sum_{j=1}^{j_2} N_{ij}^3$, где $N_{ij}^3 \in \Omega^3$, $N_{ij}^3 = 1$
P_2^2	Характеризует максимальную длину пятен дефектов области	$P_2^2 = \max \{l_k\}$, где q – число пятен области; l_k – площадь скелетезированного k-го пятна дефекта области
/	Характеризует среднюю длину пятен дефектов области	$P_3^2 = \frac{\sum_{k=1}^q l_k}{q}$, где $k = 1, q$
P_4^2	Характеризует максимальную толщину пятен дефектов области	$P_4^2 = \frac{\sum_{l=1}^n d_s^l}{0,1 \cdot n}$, где d_s^z – z-ый член последовательности $D_n = d_s^1, d_s^2, \dots, d_s^n$, которая отсортирована по толщинам пятен дефекта; $z = 0,9n$; $n = \sum_{l=1}^q Q(w_p^l)$
P_5^2	Характеризует среднюю толщину пятен дефекта области	$P_5^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^q Q_p(w_p^k) w_p^k$
P_2	Интегральный критерий области	$P_2 = \sum_{i=1}^5 k_i^2 P_i^2$, k_i^2 – весовой коэффициент значимости для критерия P_i^2 , $i = 1, 5$

Т а б л и ц а 3. Параметры для области S_3 (диагональная область темплет)

Параметр	Описание параметра	Формулы для расчета параметра
P_1^3	Характеризует общую площадь дефекта области	$P_1^3 = \sum_{i=i_1}^{i_2} \sum_{j=j_1}^{j_2} N_{ij}^3$, где $N_{ij}^3 \in \Omega^3$, $N_{ij}^3 = 1$
P_2^3	Характеризует максимальную длину пятен дефектов области	$P_2^3 = \max \{l_k\}$, где q – число пятен области; l_k – площадь скелетезированного k -го пятна дефекта области
P_3^3	Характеризует среднюю длину пятен дефектов области	$P_3^3 = \frac{\sum_{k=1}^q l_k}{q}$, где $k = 1, q$
P_4^3	Характеризует максимальную толщину пятен дефектов области	$P_4^3 = \frac{\sum_{l=z}^n d_s^l}{0,1n}$, где d_s^z – z -й член последовательности $D_n = d_s^1, d_s^2, \dots, d_s^n$, которая отсортирована по толщинам пятен дефекта; $z = 0,9n$; $n = \sum_{l=1}^q Q(w_p^l)$
P_5^3	Характеризует среднюю толщину пятен дефекта области	$P_5^3 = \sum_{k=1}^q Q_p(w_p^k) w_p^k$
P_3	Интегральный критерий области	$P_3 = \sum_{i=1}^5 k_i^3 P_i^3$, k_i^3 – весовой коэффициент значимости для критерия P_i^3 , $i = 1, 5$

Т а б л и ц а 4. Параметры для области S_4 (краевая область темплет)

Параметр	Описание параметра	Формулы для расчета параметра
P_1^4	Характеризует общую площадь дефекта области	$P_1^4 = \sum_{i=i_1}^{i_2} \sum_{j=j_1}^{j_2} N_{ij}^3$, где $N_{ij}^3 \in \Omega^3$, $N_{ij}^3 = 1$
P_2^4	Характеризует максимальную длину пятен дефектов области	$P_2^4 = \max \{l_k\}$, где q – число пятен области; l_k – площадь скелетезированного k -го пятна дефекта области
P_3^4	Характеризует среднюю длину пятен дефектов области	$P_3^4 = \frac{\sum_{k=1}^q l_k}{q}$, где $k = 1, q$
P_4	Интегральный критерий области	$P_4 = \sum_{i=1}^3 k_i^4 P_i^4$, k_i^4 – весовой коэффициент значимости для критерия P_i^4 , $i = 1, 3$

Шаг 1. Преобразование изображений макроструктуры поперечного и продольного сечения слитка с использованием алгоритма, изложенного в [3, 4].

Шаг 2. Разделение области темплетов поперечного сечения слитка на четыре области: центральную (S_1), основную (S_2), диагональную (S_3) и краевую (S_4), правила выделения областей приведены на рис. 2.

Шаг 3. Определение для каждой области изображения темплет собственных характеристик

оценки макроструктуры, описания и формулы определения которых для каждой области приведены в табл. 1–4.

Шаг 4. С использованием значений собственных характеристик областей вычисление интегрального критерия для каждой области изображения темплет (табл. 1–4).

Шаг 5. Определение характеристик макроструктуры продольного сечения темплет, описание и формулы определения которых приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Параметры для продольного сечения темплета слитка

Параметр	Описание параметра	Формулы для расчета параметра
P_1^p	Характеризует общую площадь дефекта области	$P_1^p = \sum_{i=i_1}^{i_2} \sum_{j=j_1}^{j_2} N_{ij}^3$, где $N_{ij}^3 \in \Omega^3$, $N_{ij}^3 = 1$
P_2^p	Характеризует частоту появления дефектов	$P_2^p = \sum_{i=1}^{10} \Omega_i$, где Ω_i – число пересечений дефектных объектов для луча, проведенного параллельно оси X на расстоянии h_i от центра темплета; $i = 1, 10$
P_3^p	Характеризует толщину дефектов	$P_3^p = \sum_{i=1}^{10} \omega_i$, где ω_i – толщина пересеченного дефектного объекта лучом, проведенным параллельно оси X на расстоянии h_i от центра темплета; $i = 1, 10$
P_p	Интегральный критерий области	$P_p = \sum_{i=1}^3 k_i^p P_i^p$, где k_i^p – весовой коэффициент значимости для критерия P_i^p , $i = 1, 3$

Шаг 6. Определение интегрального критерия продольного сечения темплета с использованием характеристик, определенных на шаге 5 (табл. 5).

Шаг 7. Вычисление совокупного критерия оценки качества темплета P_K на базе значений интегральных критериев областей поперечного и продольного сечений слитка по формуле (6).

Область S_1 темплета образуют пиксели p_{ij} , которые удовлетворяют условиям $i_1 = \frac{3L_x}{8} \leq i \leq \frac{5L_x}{8} = i_2$ и $j_1 = \frac{3L_y}{8} \leq j \leq \frac{5L_y}{8} = j_2$, где L_x, L_y – соответственно ширина и высота изображения темплета. Характеристиками дефектов этой области являются общая площадь дефекта (P_1^1), максимальная толщина дефекта (P_2^1), средняя толщина дефектов области (P_3^1).

Область S_2 темплета образуют пиксели p_{ij} , которые удовлетворяют условиям:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = \frac{L_x}{4} \leq i \leq \frac{3L_x}{4} = i_2 \text{ и } j_1 = \frac{3L_y}{4} \leq j \leq L_y - \frac{L_y}{10} = j_2, \\ i_1 = \frac{L_x}{4} \leq i \leq \frac{3L_x}{4} = i_2 \text{ и } j_1 = \frac{L_y}{10} \leq j \leq \frac{L_y}{4} = j_2, \\ i_1 = \frac{3L_x}{4} \leq i \leq L_x - \frac{L_x}{10} = i_2 \text{ и } j_1 = \frac{L_y}{4} \leq j \leq \frac{3L_y}{4} = j_2, \\ i_1 = \frac{L_x}{10} \leq i \leq \frac{L_x}{4} = i_2 \text{ и } j_1 = \frac{L_y}{4} \leq j \leq \frac{3L_y}{4} = j_2. \end{array} \right.$$

Характеристиками дефектов этой области являются общая площадь дефекта (P_1^2), максимальная длина дефекта (P_2^2), средняя длина дефектов области (P_3^2), максимальная толщина дефекта (P_4^2), средняя толщина дефектов области (P_5^2).

Область S_3 образуют пиксели p_{ij} , которые удовлетворяют условиям:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = \frac{3L_x}{4} \leq i \leq L_x - \frac{L_x}{10} = i_2 \text{ и } j = i \quad (\text{левая верхняя часть}), \\ i_1 = \frac{L_x}{10} \leq i \leq \frac{L_x}{4} = i_2 \text{ и } j = L_x - i \quad (\text{левая нижняя часть}), \\ i_1 = \frac{L_x}{4} \leq i \leq \frac{3L_x}{4} = i_2 \text{ и } j = i \quad (\text{правая нижняя часть}), \\ i_1 = \frac{3L_x}{4} \leq i \leq L_x - \frac{L_x}{10} = i_2 \text{ и } j = L_x - i \quad (\text{левая верхняя часть}). \end{array} \right.$$

Характеристиками дефектов этой области являются общая площадь дефекта (P_1^3), максимальная длина дефекта (P_2^3), средняя длина дефектов области (P_4^3), максимальная толщина дефекта (P_4^3), средняя толщина дефектов области (P_5^3).

Область S_4 (область по краю темплета) образуют пиксели p_{ij} , которые удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} i_1 = 0 \leq i \leq L_x = i_2 \text{ и } j_1 = L_y - \frac{L_y}{10} \leq j \leq L_y = j_2, \\ i_1 = 0 \leq i \leq \frac{L_x}{10} = i_2 \text{ и } j_1 = 0 \leq j \leq \frac{L_y}{10} = j_2, \\ i_1 = 0 \leq i \leq L_x = i_2 \text{ и } j_1 = 0 \leq j \leq \frac{L_y}{10} = j_2, \\ i_1 = L_x - \frac{L_x}{10} \leq i \leq L_x = i_2 \text{ и } j_1 = 0 \leq j \leq L_y = j_2. \end{cases}$$

Характеристиками дефектов этой области являются общая площадь дефекта (P_1^4), максимальная длина дефекта (P_2^4), средняя длина дефектов области (P_3^4).

Толщина дефекта в рассматриваемых областях вычисляется с использованием функции распределения значений толщины пятна $Q(w_p)$. Пошаговый алгоритм для определения функции $Q(w_p)$ приведен ниже.

Шаг 1. Определение точек пятна дефекта области, а именно составление множества $\Omega^4 = \{N_{ij}^4\}$, где $N_{ij}^4 = N_{ijk}^2$, если $N_{ijk}^2 = -1$ и $p_{ij} \in S_1$.

Шаг 2. Выделение среди всех точек пятна множество точек, составляющих контур пятна, а именно составление множества $\Omega^5 = \{N_{ij}^5\}$, где $N_{ij}^5 = N_{ij}^4$, если

$$N_{ij-1}^3 N_{i+1j-1}^3 N_{i+1j}^3 N_{i+1j+1}^3 N_{i+1j}^3 N_{i-1j+1}^3 N_{i-1j}^3 N_{i-1j-1}^3 = 0.$$

Шаг 3. Сканирование изображения с целью определения значений толщины пятна на различных участках пятна состоит из двух этапов: поиск базового пикселя p_{ij} , удовлетворяющего условию $N_{ij}^3 = 1$, и вычисление толщины пятна в окрестности базового пикселя по формуле:

$$w_p = \frac{(d_1 + d_2)(d_3 + d_4)}{\sqrt{(d_1 + d_2)^2 + (d_3 + d_4)^2}}, \quad (1)$$

где d_1, d_2, d_3, d_4 – значения, удовлетворяющие условиям:

$$\begin{cases} N_{ij+d_1+1} = 0, \\ N_{ij+w} = 1, \text{ где } w = \overline{1, d_1}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} N_{(i+d_2+1)j} = 0, \\ N_{(i+w)j} = 1, \text{ где } w = \overline{1, d_2}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} N_{ij-d_3-1} = 0, \\ N_{ij-v} = 1, \text{ где } v = \overline{1, d_3}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} N_{(i-d_4-1)j} = 0, \\ N_{(i-v)j} = 1, \text{ где } w = \overline{1, d_4}. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, вычисление толщины пятна w_p базируется на определении четырех расстояний:

- расстояние d_1 вниз от базового пикселя p_{ij} до первого светлого пикселя с условием, что до него все пиксели принадлежат пятну дефекта – формула (2);

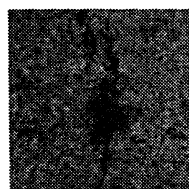
- расстояние d_2 вправо от базового пикселя до первого светлого пикселя с условием, что до него все пиксели принадлежат пятну дефекта – формула (3);

- расстояние d_3 вверх от базового пикселя до первого светлого пикселя с условием, что до него все пиксели принадлежат пятну дефекта – формула (4);

- расстояние d_4 влево от базового пикселя до первого светлого пикселя с условием, что до него все пиксели принадлежат пятну дефекта – формула (5).

В результате будет получено множество толщин для всех базовых пикселей p_{ij} изображения $\Omega^6 = \{w_p \in R\}$.

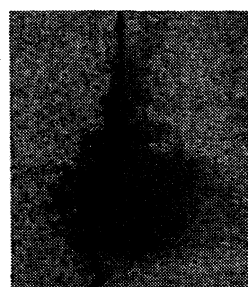
Шаг 4. Производим составление функции распределения значений толщины пятна $Q(w_p)$ по



а



б



в

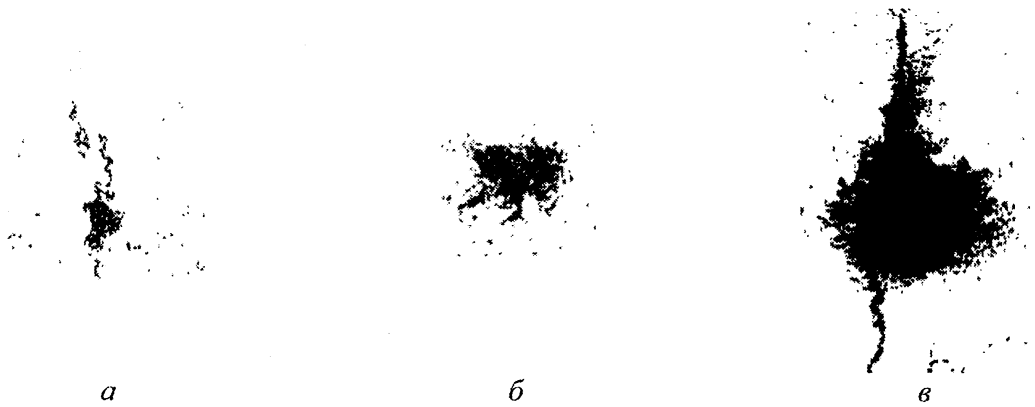


Рис. 4. Три бинаризованных фрагмента темплета с дефектами в центральной области: а – образец № 1; б – № 2; в – № 3

формуле $Q(w_p) = Q(w_p^1) \cup Q(w_p^2) \cup \dots \cup Q(w_p^q)$, где $w^k \in \left((k-1) \frac{\max\{w\}}{q}, k \frac{\max\{w\}}{q} \right)$, где q – заданное число интервалов, $k = 1, q$.

Шаг 5. Определение значения толщины пятна, который соответствует пику функции $Q(w_p)$.

Покажем результаты вычисления параметра P_2^1 на примере. Были выбраны три темплета с дефектами различного размера в центральной области (рис. 3). Проведена обработка изображений с использованием указанного выше математического аппарата. На рис. 4 показаны бинаризованные изображения фрагментов темплетов.

На рис. 5 приведены распределения значений толщины для пятен дефектов различных темплетов, полученные в результате компьютерной обработки изображений.

В результате компьютерной обработки было получено, что значение средней толщины для образца № 1 составляет 6,09, для образца № 2 – 9,82, для образца № 3 – 40,74.

Значение длины дефектов вычисляется с использованием скелетизации (утонышения) дефектных объектов. Этот алгоритм основан на методе итеративного удаления контурных точек объектов

до тех пор, пока на изображении останутся только точки скелета [5]. Этот алгоритм использует маску 3×3 пиксела, которая последовательно перемещается по изображению макроструктуры для определения нового значения центрального пиксела и, таким образом, в результате одного просмотра всего изображения удаляется один слой внешнего контура объекта. Условие, которое должно выполняться при удалении пиксела внешнего контура, состоит в следующем: связность пикселов в рассматриваемой маске 3×3 не должна нарушаться с удалением рассматриваемого пиксела контура объекта. Алгоритм процесса скелетизации (утонышения) представлен на рис. 6.

Как видно из рисунка, работа алгоритма утонышения заключается в выполнении следующих действий.

Символ 1. Начало алгоритма.

Символ 2. Определение максимальных и минимальных координат пятна $x_{\max}, x_{\min}, y_{\max}, y_{\min}$, где $x_{\max} = \max\{I\}$, $x_{\min} = \min\{I\}$, $y_{\max} = \max\{J\}$, $y_{\min} = \min\{J\}$, где I, J – множества соответственно координат по оси X и Y , для все точек распознанного пятна, т. е. выполняется условие, что i и j являются элементами множества I и J , если $N_{ij}^3 \in \Omega^3$.

Символ 3. Организация цикла $N = 1, 10$ для многократного выполнения проходов удаления точек контура пятна.

Символ 4. Формирование контура распознанного пятна дефекта, для этого проверяется условие:

$$\begin{cases} s_p + s_n < 6 \text{ и } s_p + s_n > 0, \\ s_p = 3 \text{ и } s_p = 3, \\ s_p + s_n = 7 \text{ и } s_p = 2, \\ s_p + s_n = 6 \text{ и } s_p = 2, \end{cases}$$

где $s_p = N_{(i-1)j}^3 + N_{ij+1}^3 + N_{(i+1)j}^3 + N_{ij-1}^3$, $s_n = N_{(i-1)j+1}^3 + N_{(i+1)j+1}^3 + N_{(i+1)j-1}^3 + N_{(i-1)j-1}^3$.

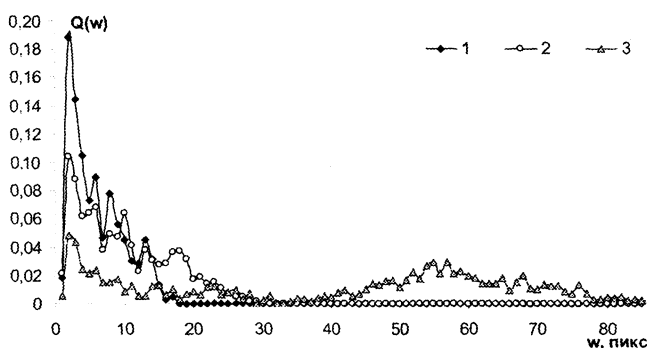


Рис. 5. Функции плотности распределения значений толщины для пятен дефектов: 1 – образец № 1; 2 – № 2; 3 – № 3

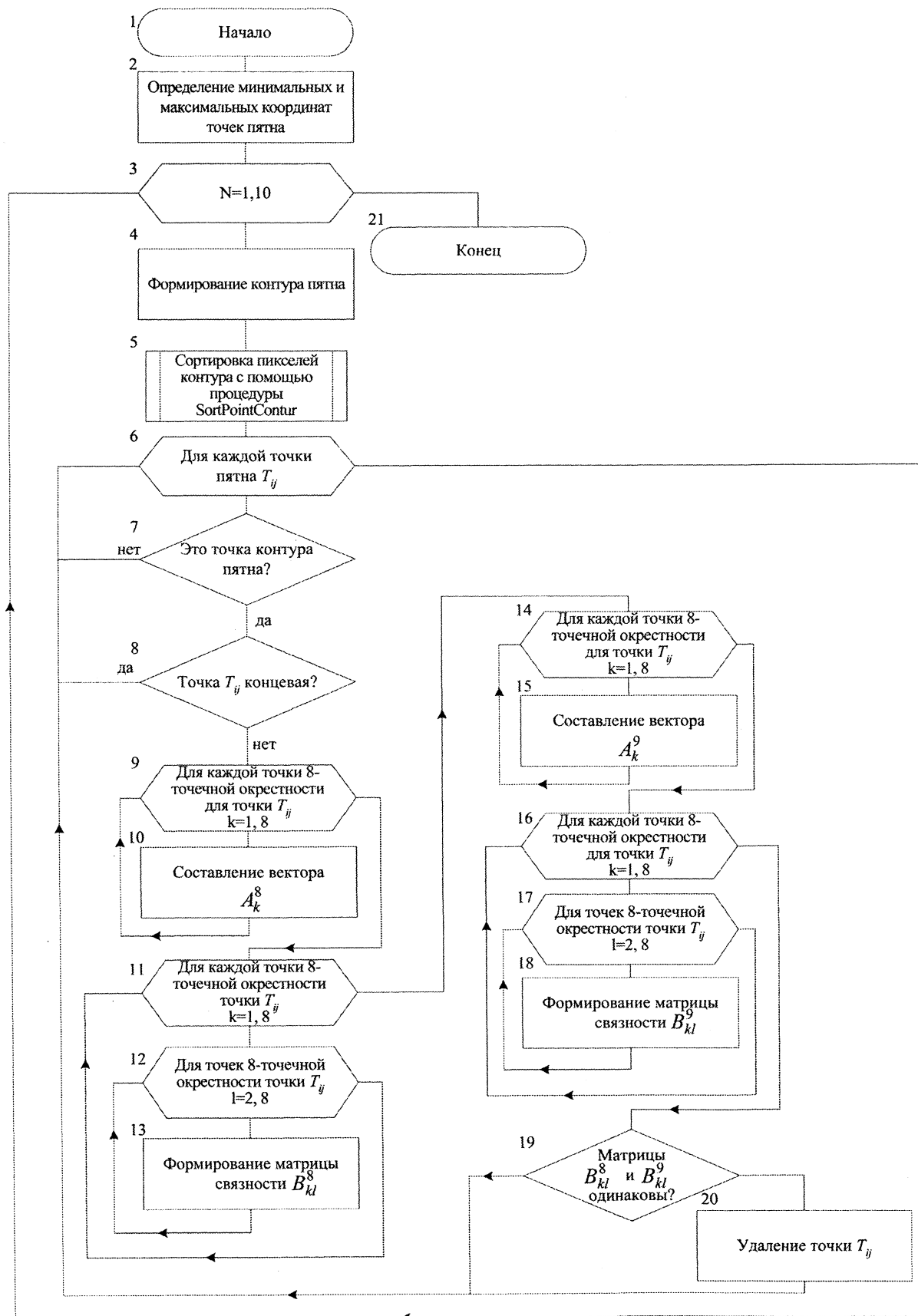


Рис. 6. Алгоритм скелетизации (утонения) пятен дефекта

Символ 5. Сортировка пикселей контура производится с помощью процедуры *SortPointContur*, суть которой состоит в создании нового массива описания последовательного расположения пикселей внешнего контура распознаваемого объекта.

Символ 6. Организация цикла для перебора всех точек распознанного пятна для каждой точки T_{ij} , где i, j – координаты по X и Y изображения макроструктуры.

Символ 7. Проверка, является ли точка T_{ij} точкой контура, если да, то переход к символу 8, если нет, то к символу 6.

Символ 8. Проверка, является ли точка T_{ij} концевой точкой пятна, это производится с помощью следующего условия:

$$\begin{cases} i \neq x_{\min}, \\ i \neq x_{\max}, \\ j \neq y_{\min}, \\ j \neq y_{\max}, \\ s_p + s_n > 2. \end{cases}$$

Если условие выполняется, то производится переход к следующему символу, если нет, то переход к символу 6.

Символ 9. Организация цикла $K = 1, 8$ для перебора всех точек 8-точечной окрестности для точки T_{ij} .

Символ 10. Для каждой точки 8-точечной окрестности точки T_{ij} производится формирование вектора множеств точек изображения A_k^8 . Обозначим упорядоченное множество, описывающее 8-точечную окрестность точки T_{ij} , как $\theta_{ij} = \{T_{(i-1)j},$

$T_{(i-1)j+1}, T_{ij+1}, T_{(i+1)j+1}, T_{(i-1)j}, T_{(i+1)j-1}, T_{ij-1}, T_{(i-1)j-1}\}$, тогда элемент θ_{ij}^k является k -м элементом множества θ_{ij} . Тогда вектор A_k^8 определяется по формуле:

$$A_k^8 = \theta_{mn} \cap \theta_{ij}, \text{ если } N_{mn}^3 \in \Omega^3,$$

где $T_{mn} = \theta_{ij}^k, m = \{i-1, i, i+1\}, n = \{j-1, j, j+1\}$.

Символ 11. Организация цикла $k = 1, 8$ для перебора всех точек 8-точечной окрестности для точки T_{ij} .

Символ 12. Организация цикла $l = 2, 8$ для перебора точек 8-точечной окрестности для точки T_{ij} .

Символ 13. Формирование матрицы связности B_{kl}^8 . Если для двух точек $\theta_{ij}^k, \theta_{ij}^l \in \theta_{ij} A_k^8 \cap A_l^8 \neq 0$, то $B_{kl}^8 = 1$.

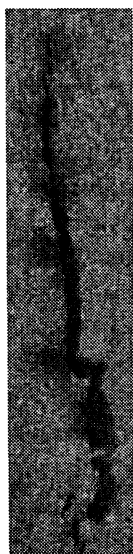
Символ 14. Организация цикла $K = 1, 8$ для перебора всех точек 8-точечной окрестности для точки T_{ij} .

Символ 15. Для каждой точки 8-точечной окрестности точки T_{ij} производится формирование вектора множеств точек изображения A_k^9 . Обозначим упорядоченное множество, описывающее 8-точечную окрестность точки T_{ij} , как $\eta_{ij} = \{T_{ij}, T_{(i-1)j}, T_{(i-1)j+1}, T_{ij+1}, T_{(i+1)j+1}, T_{(i-1)j}, T_{(i+1)j-1}, T_{ij-1}, T_{(i-1)j-1}\}$, тогда элемент η_{ij}^k является k -м элементом множества η_{ij} . Тогда вектор A_k^9 определяется по формуле:

$$A_k^9 = \eta_{mn} \cap \eta_{ij}, \text{ если } N_{mn}^3 \in \Omega^3,$$

где $T_{mn} = \eta_{ij}^k, m = \{i-1, i, i+1\}, n = \{j-1, j, j+1\}$.

Символ 16. Организация цикла $k = 1, 8$ для перебора всех точек 8-точечной окрестности для точки T_{ij} .



а



б



в

Рис. 7. Результат скелетизации распознанного пятна дефекта макроструктуры (данные РУП «БМЗ»): а – исходное изображение пятна; б – бинаризованное изображение пятна; в – скелетизированное изображение пятна

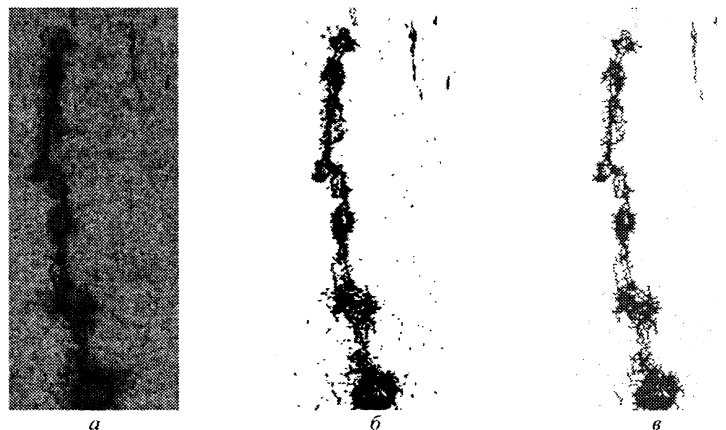


Рис. 8. Результат скелетизации распознанного пятна дефекта макроструктуры (данные РУП «БМЗ»): *a* – исходное изображение пятна; *б* – бинаризованное изображение пятна; *в* – скелетизированное изображение пятна

Символ 17. Организация цикла $l = 2, 8$ для перебора точек 8-точечной окрестности для точки T_{ij} .

Символ 18. Формирование матрицы связности B_{kl}^9 . Если для двух точек $\eta_{ij}^k, \eta_{ij}^l \in \eta_{ij}$ $A_k^9 \cap A_l^9 \neq 0$, то $B_{kl}^9 = 1$.

Символ 19. Сравнение матриц B_{kl}^8 и B_{kl}^9 . Если они одинаковы, то переход к символу 20, если нет, то переход к символу 6.

Символ 20. Удаление точки контура T_{ij} .

Символ 21. Конец алгоритма.

Для иллюстрации работы алгоритма скелетизации были выбраны два фрагмента с дефектами в диагональной области темплета. На рис. 7, 8 приведены исходные изображения дефектов, изображения после бинаризации и применения алгоритма скелетизации.

Для макроструктуры темплетов продольного сечения обрабатывается вся область темплета. Характеристиками количественной оценки дефектов продольного сечения дефектов являются общая площадь дефекта (P_1^p), частота появления дефектов (P_2^p), толщина дефектов (P_3^p).

Расчет совокупного критерия оценки макроструктуры производится с учетом характеристик поперечного и продольного сечений заготовки слитка (по всей области изображения) по формуле:

$$\begin{cases} P_K = l_1 \sum_{i=1}^4 k_i P_i + l_2 P_p, \\ \sum_{i=1}^4 k_i = 1, \\ l_1 + l_2 = 1, \end{cases} \quad (6)$$

где P_i – интегральный критерий области S_i темплета; k_i – весовой коэффициент значимости области S_i темплета, $i = 1, 4$; l_1 и l_2 – весовые коэффициенты значимости дефектов поперечного и продольного сечения темплета.

Таким образом, для выбора наилучшего технологического режима разливки можно использовать функцию цели в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} P_1 = \sum_{i=1}^3 k_i^1 P_i^1, \\ P_2 = \sum_{i=1}^5 k_i^2 P_i^2, \\ P_3 = \sum_{i=1}^5 k_i^3 P_i^3, \\ P_4 = \sum_{i=1}^5 k_i^4 P_i^4, \\ P_K = l_1 \sum_{i=1}^4 k_i P_i + l_2 P_p \rightarrow \min. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, представленные алгоритмы позволяют провести компьютерную обработку фотографий макроструктуры слитков с целью количественной оценки их дефектов. Функция (7) может использоваться для ранжирования режимов, задаваемых при испытаниях с целью дальнейшей их оптимизации на основе целевой функции P_K , определяющей уровень дефектности заготовки.

Литература

1. Емсельнов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок // Металлургия. Мн.: Выш. шк., 1988.
2. Евтеев Д. П., Колыбалов И. Н. Непрерывное литье стали. М.: Металлургия, 1984.
3. Чичко А. Н., Сачек О. А., Лихоузов С. Г. О новых математических методах классификации изображений микроструктур сталей // Литье и металлургия. 2008. № 2. С. 103–108.
4. Чичко А. Н., Сачек О. А., Веденеев А. В. Алгоритмы обработки изображений микроструктур сталей для определения межпластиночных расстояний феррита и цементита // Литье и металлургия. 2009. № 1. С. 86–93.
5. Абрамэйко С. В., Лагуновский Д. М. Обработка изображений: технология, методы, применение. Мн.: Амафсея, 2000.