

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР ЧУГУНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ОТЛИВОК ПО ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ

*д-р физ.-мат. наук, проф. А.Н. ЧИЧКО,
канд. техн. наук С.Г. ЛИХОУЗОВ, д-р техн. наук, проф. В.Ф. СОБОЛЕВ,
О.А. САЧЕК, канд. техн. наук О.И. ЧИЧКО
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Предложен математический аппарат для обработки изображений микроструктуры чугунов перлитного класса, имеющих в структуре случайно распределенные включения графита. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять статистическое распределение функции плотности характеристик графитных включений по площадям, периметрам и расстояниям между включениями. Получена зависимость между одной из характеристик статистического распределения графита и соотношения основных элементов химического состава. Показано, что компьютерная обработка изображения микроструктуры серого чугуна позволяет классифицировать неразличимые традиционными металлографическими методами микроструктуры на основе статистического распределения графитной фазы и межпластиночных расстояний перлита, что имеет практическое значение для исследования взаимосвязей «обрабатываемость – микроструктура чугуна».

Введение. Известно, что обрабатываемость деталей в значительной степени зависит от микроструктуры и свойств металла. Причем, чем больше количество графита в микроструктуре и крупнее его включения, тем легче деталь обрабатывается резанием [1]. В связи с этим представляет научный интерес установление взаимосвязей между обрабатываемостью чугунов и особенностями микроструктурного строения фаз графита. Как показывает опыт многих исследователей, выявить различие между особенностями микроструктуры серых чугунов, используя традиционные металловедческие методы, основанные на бальных методиках графита, достаточно сложно. Поэтому нужны новые подходы, позволяющие выявить взаимосвязи между характеристиками микроструктуры и свойствами чугунов. Наиболее перспективными методами количественной оценки микроструктур являются методы, основанные на компьютерной обработке изображений, которые находят широкое применение в технических приложениях [2].

Целью настоящего исследования является разработка методики определения характеристик графитной фазы в серых чугунах, позволяющей количественно оценить микроструктуру различных деталей.

Основная часть. В качестве исходных данных были использованы две группы деталей «коленвал», которые были изготовлены с использованием разных технологий. В первую группу образцов (группа А) входили изделия, обрабатываемость которых была в два раза ниже, чем у изделий второй группы (группа В). Было исследовано по пять образцов каждой группы и по четыре снимка микроструктуры с каждого образца. Таким образом, всего в исследовании участвовало 40 снимков.

Анализ изображений микроструктуры по стандартной металловедческой методике показал, что все включенные в выборку микроструктуры деталей с различной обрабатываемостью не классифицируются на две группы (табл. 1). Поэтому для решения задачи классификации данных микроструктур из серого чугуна необходимо разработать новую методику.

Таблица 1

Сравнительные характеристики микроструктуры отливок «коленвал»,
определенные по стандартной методике

Параметры микроструктуры	Отливки группы А					Отливки группы В				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Форма графита (прямолинейная)	ПГ _ф 1	ПГ _ф 1	ПГ _ф 1	ПГ _ф 1	ПГ _ф 1	ПГ _ф 1	ПГ _ф 1	ПГ _ф 2	ПГ _ф 1	ПГ _ф 1
Длина включений графита	ПГ _д 90	ПГ _д 45	ПГ _д 45	ПГ _д 45	ПГ _д 90	ПГ _д 90	ПГ _д 45	ПГ _д 40 ПГ _д 80	ПГ _д 90 ПГ _д 180	ПГ _д 90
Распределение включений графита	ПГ _р 1 равн.	ПГ _р 3 колон.	ПГ _р 1 колон.	ПГ _р 1 равн.	ПГ _р 1 равн.	ПГ _р 1 равн.	ПГ _р 1 равн.	ПГ _р 1 равн.	ПГ _р 1 равн.	ПГ _р 1 равн.
Количество включений графита, %	ПГ 4	ПГ 4	ПГ 6	ПГ 4	ПГ 6	ПГ 4	ПГ 6	ПГ 6	ПГ 6	ПГ 6
Металлическая основа	П _т 1	П _т 1	П _т 1	П _т 1	П _т 1	П _т 1	П _т 1	П _т 1	П _т 1	П _т 1
Дисперсность перлита	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,2 П _д 0,5	П _д 0,3 П _д 0,5
Количество перлита, %	98	100	97	99	98	100	99	98	98	97
Количество феррита, %	2	—	3	1	2	—	1	2	2	3

В каждом исследуемом изделии было выделено характерное сечение, которое подвергалось анализу (рис. 1). Как видно из рисунка, для каждого сечения было выделено четыре участка. Участок Φ_1 (фотография 1) расположен на краю выделенного сечения и соответствовал области припуска детали, участок сечения Φ_4 (фотография 4) соответствовал центральной области выделенного сечения, участки Φ_2 и Φ_3 являлись промежуточными для выделенного сечения. Использование различных участков позволило увеличить представительность используемой выборки и повысить точность расчета микроструктуры, а также оценить влияние скорости кристаллизации на микроструктуру.

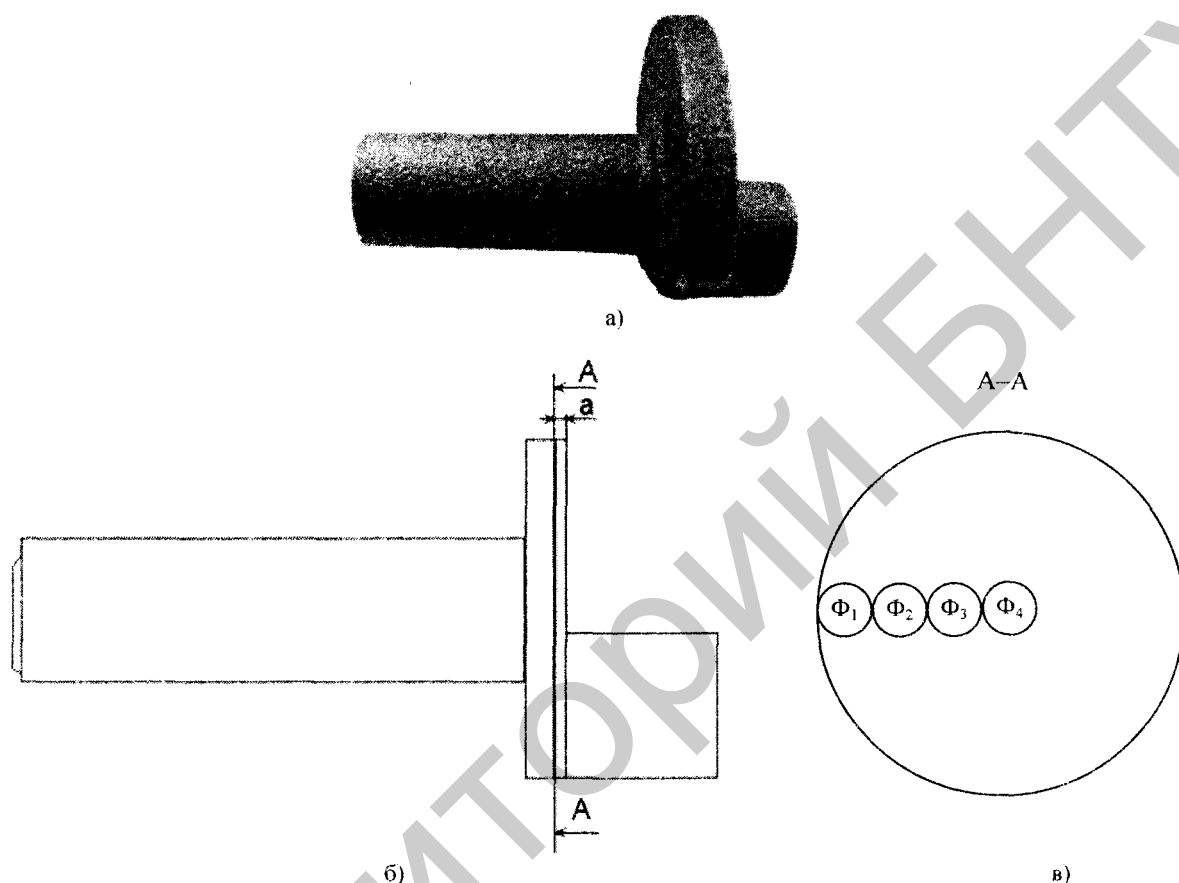


Рис. 1. Изображение детали «коленвал» (а) и схема расположения областей исследованных изображений микроструктур (в) на выбранном сечении (б) (порядок: край → центр)

В основе предлагаемого подхода 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. Пошаговое описание алгоритма представлено ниже.

Шаг 1. Формирование исходного множества Ω^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, 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.

Шаг 2. Создание полутонового изображения микроструктуры при помощи функций пороговой обработки с использованием формулы (1) (множество $\Omega^1 = \{N_{ij}^1 \in R \mid 0 \leq N_{ij}^1 \leq 1\}$).

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

Шаг 3. Преобразование изображения по правилу (2) в вектор длиной m бинаризованных изображений $\Omega^2 = \{\Omega_1^2, \Omega_2^2, \dots, \Omega_m^2\}$, где $\Omega_k^2 = \{N_{ij}^2\}$, $k=1, m$:

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

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

Шаг 4. Создание бинаризованного изображения микроструктуры из полученного вектора $\Omega^3 = \{N_{ij}^3 \mid N_{ij}^3 = 0 \text{ или } N_{ij}^3 = 1\} = \Omega_l^3$, где l – индекс вектора параметров α , для которого выполняется условие (3):

$$\mu - \frac{\varepsilon}{2} < \alpha_l < \mu + \frac{\varepsilon}{2}, \quad (3)$$

$$\text{где } \alpha_k = \frac{\sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} t_{ij}^k}{L_x L_y - \sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} t_{ij}^k}, \quad t_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } N_{ij}^2 = -1 \\ 0, & \text{если } N_{ij}^2 = 1 \end{cases}, \quad k=1, m; \mu - \text{ заданное значение; } \varepsilon - \text{ отклонение } \mu.$$

Шаг 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 Ω^4 производится распознавание несвязных структур (графитных включений) путем создания множества $Q = \{q_i \mid i=1, k\}$, где k – число несвязных структур, которое увеличивается в процессе распознавания изображения. Формирование множества Ω^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 $\begin{cases} N_{i-1,j}^4 = q_a; \\ N_{i-1,j}^3 = 1; \end{cases} \cup \begin{cases} N_{i,j-1}^4 = q_b; \\ N_{i,j-1}^3 = 1; \end{cases}$, 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 $k = k + 1$; $N_{ij}^4 = k$.

Шаг 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) .

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

Шаг 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 $N_{j-1,j}^4 = 0 \cup N_{i+1,j}^4 = 0 \cup N_{i,j-1}^4 = 0 \cup N_{i,j+1}^4 = 0$, тогда $p_{N_{ij}^4} = p_{N_{ij}^4} + 1$.

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

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

Шаг 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 Δq_s , Δq_p , Δq_r .

По данному алгоритму было разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс обработки микроструктуры серых чугунов. Программа «Автоматизированная обработка микроструктур серого чугуна» («АОМ-2 сч») позволяет проводить анализ фотографий нетравленных микроструктур серого чугуна, сделанных на микроскопе, с помощью новой методики, основанной на компьютерной обработке, позволяющей с высокой степенью точности на количественном уровне определять статистическое распределение графитной фазы в микроструктуре изделия. Программа «АОМ-2 сч» 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.

Результаты компьютерной обработки микроструктур для четырех областей образцов групп *A* и *B* представлены в таблицах 2, 3. Интегральное статистическое распределение значений площади включений графита $H_s^{sym}(s)$ рассчитывалось по формуле:

$$H_s^{sym}(s_i) = \sum_{j=1}^4 H_s^j(s_i),$$

где s_i – i -й интервал дискретизации, $i = 1, 21$; H_s^j – функция распределения значений площадей включений графита для j -й области сечения образца.

Аналогично рассчитывались интегральные распределения значений периметров включений графита и расстояний между ними.

Таблица 2

Расчетные статистические распределения по микроструктурам (использовано 20 микроструктур) площади S , периметра включений графита и параметра S/P по областям $\Phi_1 \dots \Phi_4$ для образцов групп *A* и *B*

Значения функции распределения параметров, о.е.								
$H_s^{sym}(s)$ (площадь включений графита S) для образцов группы			$H_p^{sym}(p)$ (периметр включений графита P) для образцов группы			$H_{sp}^{sym}(s/p)$ (отношение площади к периметру включений графита S/P) для образцов группы		
Интервал, пикс	<i>A</i>	<i>B</i>	Интервал, пикс	<i>A</i>	<i>B</i>	Интервал, пикс	<i>A</i>	<i>B</i>
0...25	0,6496	0,6748	0...25	0,6101	0,6370	0...0,25	0,2113	0,2077
25...50	0,0824	0,0953	25...50	0,1408	0,1603	0,25...0,50	0,2929	0,2906
50...75	0,0484	0,0512	50...75	0,0726	0,0705	0,50...0,75	0,1176	0,1284
75...100	0,0360	0,0339	75...100	0,0512	0,0440	0,75...1,00	0,0936	0,1079
100...125	0,0270	0,0249	100...125	0,0310	0,0246	1,00...1,25	0,0744	0,0757
125...150	0,0216	0,0184	125...150	0,0233	0,0178	1,25...1,50	0,0613	0,0586
150...175	0,0175	0,0151	150...175	0,0152	0,0110	1,50...1,75	0,0458	0,0418
175...200	0,0138	0,0116	175...200	0,0121	0,0087	1,75...2,00	0,0341	0,0299
200...225	0,0121	0,0100	200...225	0,0085	0,0058	2,00...2,25	0,0243	0,0207
225...250	0,0105	0,0081	225...250	0,0068	0,0047	2,25...2,50	0,0161	0,0150
250...275	0,0085	0,0065	250...275	0,0055	0,0030	2,50...2,75	0,0106	0,0094
275...300	0,0076	0,0057	275...300	0,0041	0,0024	2,75...3,00	0,0068	0,0061
300...325	0,0064	0,0049	300...325	0,0033	0,0018	3,00...3,25	0,0039	0,0034
325...350	0,0059	0,0045	325...350	0,0030	0,0017	3,25...3,50	0,0027	0,0020
350...375	0,0048	0,0040	350...375	0,0020	0,0011	3,50...3,75	0,0016	0,0011
375...400	0,0041	0,0031	375...400	0,0018	0,0009	3,75...4,00	0,0011	0,0008
400...425	0,0038	0,0026	400...425	0,0013	0,0008	4,00...4,25	0,0006	0,0005
425...450	0,0033	0,0026	425...450	0,0012	0,0007	4,25...4,50	0,0006	0,0004
450...475	0,0031	0,0020	450...475	0,0009	0,0005	4,50...4,75	0,0004	0,0002
475...500	0,0024	0,0020	475...500	0,0010	0,0004	4,75...5,00	0,0002	0,0002
> 500	0,0315	0,0192	> 500	0,0048	0,0026	> 5,00	0,0003	0,0002

Расчетные параметры для фотографий микроструктур образцов групп *A* и *B*

Параметр изображения	Образцы группы <i>A</i>					Образцы группы <i>B</i>				
	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	по всем областям	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	по всем областям
Число включений графита, о.е.	44 643	30 242	28 347	26 663	129 895	53 081	37 779	38 145	34 788	163 793
Средняя площадь включений графита, пикс	54,55	83,30	82,61	80,91	75,34	52,91	62,83	56,27	59,11	57,78
Доля графитной фазы в микроструктуре, о.е.	0,142	0,128	0,121	0,113	0,13	0,153	0,124	0,111	0,106	0,12

Анализ данных таблицы 3 показал, что доля графита для обеих групп образцов уменьшается при перемещении анализируемой области от края к центру, а именно, для группы *B* – от 0,153 до 0,106 (в 1,44 раза), для группы *A* – от 0,142 до 0,113 (в 1,26 раза). Причем для зоны припуска в образцах группы *B* в 1,08 раза больше графита и на 20 % больше графитных включений, чем у образцов группы *A*, что подтверждает лучшую обрабатываемость образцов группы *B*. Кроме того, по функциям статистического распределения характеристик включений графита были сделаны выводы о различиях площадей и периметров графитных включений для образцов двух групп. Так, в образцах группы *B* больше включений малой площади (до 75 пикселей) и периметра (до 50 пикселей) на 23 и 18 % соответственно, тогда как для образцов группы *A* больше графитных включений с большей площадью и более развитым периметром. Таким образом, средняя площадь включений графита в микроструктурах образцов группы *B* по всем областям изображения на 23 % меньше по сравнению с образцами группы *A*.

В результате оценки относительных расстояний графитных включений друг относительно друга был сделан вывод о том, что для образцов группы *B* характерно более компактное расположение включений графита, тогда как в микроструктурах образцов группы *A* включения графита более удалены друг относительно друга, что особенно заметно в зоне припуска деталей. На рисунке 2 представлены результаты сравнения микроструктур двух групп образцов по расстояниям между включениями графита в зоне припуска.

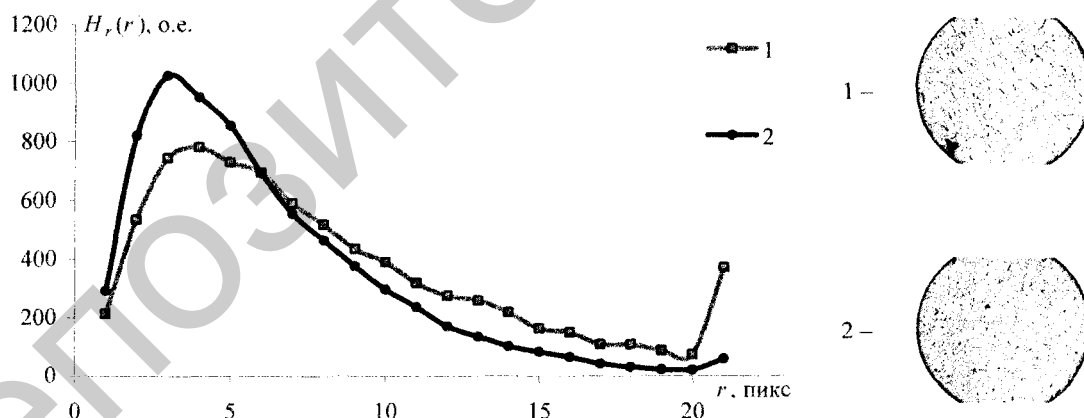


Рис. 2. Распределение расстояний между включениями графита в зоне припуска и соответствующие им микроструктуры образцов групп *A* и *B*:
1 – образцы группы *A*; 2 – образцы группы *B*

На следующем этапе исследования была поставлена задача – исследовать взаимосвязи между характеристиками микроструктуры отливок «коленвал» и параметрами химического состава. При рассмотрении химического состава учитывались не только содержание основных элементов в сером чугуна, но и соотношения между элементами, от которых зависит структурообразование, а значит и обрабатываемость исследуемых деталей. Так, на рисунке 3 показано влияние химического соотношения углерода к кремнию (C/Si) на характеристику графита r_{40} в микроструктуре, характеризующую число расстояний между включениями графита $> 30,77 \cdot 10^{-6}$ м. Как видно из рисунка, данный показатель микроструктуры коррелирует с отношениями химического состава. Чем выше соотношение указанных элементов, тем больше

показатель r_{40} в микроструктуре. Причем все микроструктуры, соответствующие образцам группы *A* лежат выше линейной регрессии, описывающей распределение точек, что может свидетельствовать о том, что по соотношениям химического состава образцы могут быть классифицированы по отдельным группам.

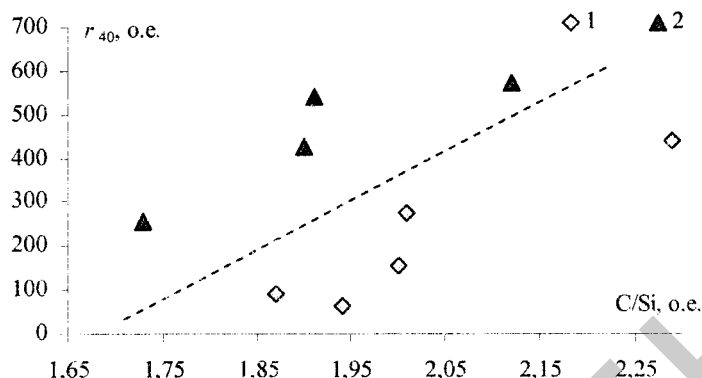


Рис. 3. Зависимость параметра r_{40} , характеризующего большие расстояния между включениями графита от соотношения химического состава чугуна C/Si для образцов групп *A* и *B*:
1 – образцы группы *B*; 2 – образцы группы *A*

На следующем этапе с целью выявления различий в дисперсности перлита чугуна для различных образцов были проведены исследования статистического распределения межпластиночных расстояний перлитной матрицы серого чугуна для изображений микроструктур, сделанных на микроскопе с увеличением $\times 4000$. Для определения межпластиночных расстояний использовалось программное обеспечение «АОМ-1» [3]. Большая часть образцов группы *A* имеет более тонкое пластинчатое строение перлита чугуна и большую долю малых межпластиночных расстояний по сравнению с образцами группы *B* (рис. 4).

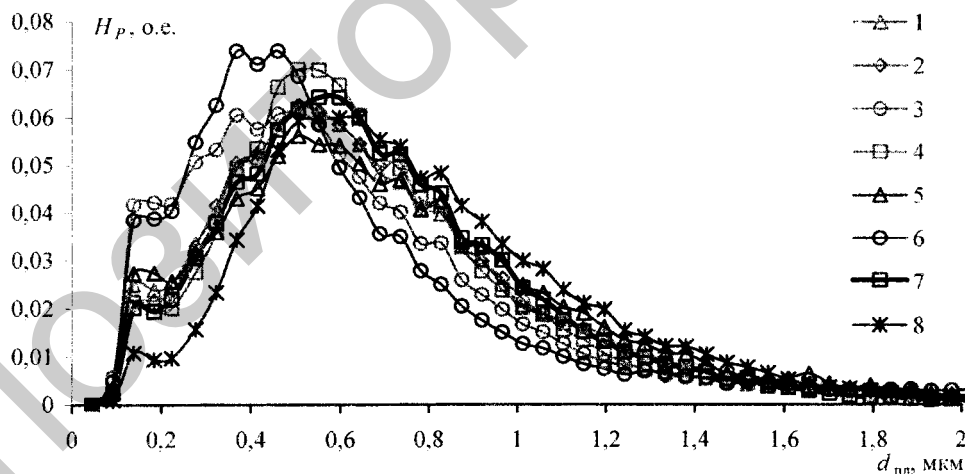


Рис. 4. Статистические распределения межпластиночных расстояний серого чугуна для микроструктур образцов групп *A* и *B*:
1 – 4 – образцы группы *A*; 5 – 8 – образцы группы *B*

Следует отметить, что толщины цементита в области высокодисперсного перлита (0...0,4 мкм) для образцов группы *A* больше, чем аналогичные толщины цементита в образцах группы *B*.

Для деталей группы *B* характерна большая доля эвтектоидных колоний с меньшей дисперсностью, чем для деталей группы *A*, причем для больших межпластиночных расстояний эта тенденция четко проявляется. У деталей группы *B* во всех исследованных зонах графит имеет более развитую поверхность в сравнении с деталями группы *A*. С технологической точки зрения присутствие в образцах группы *B* более мелкодисперсного графита свидетельствует о более высоких скоростях охлаждения и большем числе зародышей.

Заключение

Разработан алгоритм для компьютерной обработки изображений микроструктуры чугунов перлитного класса, имеющих в структуре случайно распределенные включения графита.

Алгоритм включает:

- бинаризацию изображения с использованием адаптивного порога;
- сегментацию изображения для выделения включений графита;
- обработку графитных включений с вычислением их площадей, периметров и расстояний между ними;
- определение функции статистического распределения перечисленных параметров.

Показано, что компьютерная обработка изображений микроструктуры серого чугуна позволяет классифицировать неразличимые традиционными металлографическими методами микроструктуры серого чугуна, соответствующие деталям с различной обрабатываемостью, на основе статистического распределения характеристик графитной фазы и межпластиночных расстояний перлита, что имеет практическое значение для исследования взаимосвязей «обрабатываемость – микроструктура чугуна».

ЛИТЕРАТУРА

1. Пивоварский, Е.П. Высококачественный чугун: в 2 т. / Е.П. Пивоварский. – М.: Металлургия, 1965. – 1174 с.
2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Лихоузов, С.Г. О методах компьютерной обработки микроструктур сталей с различной дисперсностью перлита / С.Г. Лихоузов, О.А. Сачек, А.Н. Чичко // Информатика и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 19 – 29.

Поступила 06.12.2010

COMPUTER PROCESSING OF IMAGES OF MICROSTRUCTURES OF PIG-IRON FOR THE DECISION OF THE PROBLEM OF CLASSIFICATION OTЛИВОК ON THE WORKABILITY

**A. CHICHKO, S. LIKHOUZOV, W. SOBOLEV,
O. SACHEK, O. CHICHKO**

The mathematical apparatus for processing of images of a cast-iron's microstructure of a pearlite class, having in structure casually distributed inclusions of graphite is offered. The software is developed, allowing to define statistical distribution of function of density of characteristics of graphitic inclusions on the areas, perimeters and distances between inclusions. Dependence between one their characteristics of statistical distribution of graphite and a parity of basic elements of a chemical compound is received. It is shown that computer processing of the image of a microstructure of gray pig-iron allows to classify indiscernible traditional metallographic methods of a microstructure on the basis of statistical distribution of a graphitic phase and distances between pearlite colonies that has practical value for research of interrelations "a workability – a cast iron's microstructure".