

УДК 519.6:621.74

О МЕТОДАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

*д-р физ.-мат. наук, проф. А.Н. ЧИЧКО, О.А. САЧЕК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Предложен метод для математического описания микроструктур перлитных сталей, основанный на обработке изображений и расчетах функции плотности распределения межпластиночных расстояний. С использованием данного метода исследованы характеристики микроструктур катанки перлитных сталей, используемой в металлургическом производстве для изготовления бортовой проволоки. Показано, что использование предлагаемой методики для расчета усредненного межпластиночного расстояния в эвтектоидных колониях перлитной стали позволяет устранить субъективный фактор при выборе колонии, снизить время обработки микроструктуры, автоматизировать процесс определения расстояния по сравнению с традиционным методом. Предложена группа интегральных параметров для количественного описания микроструктур перлитной стали на базе значений функции распределения межпластиночных расстояний. На основе метода таксономии показано, что микроструктуры перлитной стали могут быть разделены на различные классы с помощью характеристик изображений. Показаны пути использования функции плотности распределения для исследования взаимосвязей между характеристиками микроструктуры и свойствами перлитной стали.

Известно, что микроструктуры перлитных сталей, полученные в неравновесных условиях, состоят из неоднородно распределенных эвтектоидных колоний, образовавшихся после распада аустенита [1]. При этом на различных участках микроструктуры размеры межпластиночного расстояния системы «феррит – цементит» могут отличаться в несколько раз. В этих условиях установление взаимосвязей между характеристиками микроструктуры и свойствами стали практически невозможно, если использовать традиционные подходы, основанные на качественном анализе микроструктуры [2]. Простое усреднение параметров микроструктуры сглаживает особенности строения эвтектоидных колоний, и исследование взаимосвязей между свойствами стали и его параметрами микроструктуры еще более усложняется. В то же время современные компьютерные методы обработки изображений открывают новые возможности для исследования взаимосвязей типа «структура – свойство» [3].

Цель исследования – разработка метода математического описания микроструктур перлитных сталей на основе функции распределения межпластиночных ферритоцементитных расстояний для установления взаимосвязей «микроструктура – свойство».

Известно, что «изображение микроструктуры» содержит в себе гораздо больше информации, чем та, которую традиционно используют металловеды в своих научных исследованиях. Поэтому основная проблема в использовании современных методов обработки микроструктуры состоит в математическом описании изображения микроструктуры набором количественных характеристик. В работе развивается метод, основанный на математическом описании микроструктуры сплава через функцию распределения ее структурных характеристик. В данном случае речь идет о моделировании изображения микроструктуры перлитной стали функцией распределения межпластиночных расстояний эвтектоидных колоний.

В статье развивается метод треугольников, которой реализован в нижеприведенном алгоритме. Сущность метода треугольников заключается в том, что по бинаризованному изображению производится построение множества треугольников, по площади которых и определяется межпластиночное расстояние. Предложенный метод треугольников является одним из компонентов более общего алгоритма обработки микроструктуры перлитной стали с целью ее математического описания.

Предлагается следующая общая алгоритмическая схема для исследования взаимосвязей «микроструктура – свойство» на основе функции распределения межпластиночных расстояний перлита.

Шаг 1. Формирование выборки, состоящей из свойств сплава (W_i) и микроструктур образцов.

Шаг 2. Определение функции распределения межпластиночных расстояний по изображениям микроструктур (алгоритм приведен ниже).

Шаг 3. Вычисление характеристик функции распределения.

Шаг 4. Формирование исходной матрицы для исследования взаимосвязей «микроструктура – свойство».

Шаг 5. Определение статистических характеристик взаимосвязей «микроструктура – свойство» $W_i = f(S_j)$.

Шаг 6. Построение регрессионных уравнений взаимосвязей «микроструктура – свойство» $W_i = f(S_j)$.

Шаг 7. Установление причин изменения свойств сплава по наиболее значимым характеристикам микроструктуры.

Для построения функции распределения межпластиночных расстояний эвектоидных колоний по изображению микроструктуры предлагается следующий математический аппарат.

На первом этапе из исходного изображения микроструктуры, являющегося множеством $\Omega^0 = \{N_{ij}^0 \in N\}$, где N_{ij}^0 – значение яркости цветного изображения в точке (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 пикселах по осям координат X и Y соответственно; при помощи функций пороговой обработки с использованием формулы (1) создается полутоновое изображение микроструктуры (множество $\Omega^1 = \{N_{ij}^1 \in R \mid 0 \leq N_{ij}^1 \leq 1\}$).

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

Далее с помощью преобразования (2) изображение трансформируется в вектор длиной m бинаризованных изображений $\Omega^2 = \{\Omega_1^2, \Omega_2^2, \dots, \Omega_m^2\}$, где $\Omega_k^2 = \{N_{ijk}^2\}$, $k = 1, m$.

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

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

Из полученного вектора изображений выбирается бинаризованное изображение микроструктуры $\Omega^3 = \{N_{ij}^3 \mid N_{ij}^3 = 0 \text{ или } N_{ij}^3 = 1\} = \Omega_l^3$, где l – индекс вектора параметров α , для которого выполняется условие (3).

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

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

Затем производится сканирование изображения с целью определения межпластиночных расстояний микроструктуры, которое состоит из нескольких этапов:

1) поиск базового пикселя p_{ij} , удовлетворяющего условию $N_{ij}^3 = 1$;

2) вычисление межпластиночного расстояния d_{ij}^{mn} , содержащего базовый пиксель p_{ij} , производится по формуле:

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

где d_1, d_2, d_3, d_4 – значения, удовлетворяющие соответственно условиям (4) – (7);

$$\begin{cases} N_{i, (j+d_1+1)}^3 = 0; \\ N_{i, (j+w)}^3 = 1, \text{ где } w = \overline{1, d_1}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} N_{(i+d_2+1), j}^3 = 0; \\ N_{(i+w), j}^3 = 1, \text{ где } w = \overline{1, d_2}; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} N_{i, (j-d_3-1)}^3 = 1; \\ N_{i, (j-v)}^3 = 1, \text{ где } v = \overline{1, a}; \\ N_{i, (j-w)}^3 = 0, \text{ где } w = \overline{a+1, d_3}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} N_{(i-d_4-1), j}^3 = 1; \\ N_{(i-v), j}^3 = 0, \text{ где } w = \overline{1, a}; \\ N_{(i-w), j}^3 = 0, \text{ где } w = \overline{a+1, d_4}. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, вычисление видимого межпластиночного расстояния d_{ij}^{mn} базируется на определении четырех расстояний:

- расстояния d_1 , определяемого вниз от базового пиксела p_{ij} до первого пиксела феррита, с условием, что до него все пиксели принадлежат одной цементитной пластине – формула (4);
- расстояния d_2 , определяемого вправо от базового пиксела до первого пиксела феррита, с условием, что до него все пиксели принадлежат одной цементитной пластине – формула (5);
- расстояния d_3 , определяемого вверх от базового пиксела до первого пиксела следующей цементитной пластины, с условием, что до нее имеется пластина феррита – формула (6);
- расстояния d_4 , определяемого влево от базового пиксела до первого пиксела следующей цементитной пластины, с условием, что до нее имеется пластина феррита – формула (7).

В результате будет получено множество расстояний для всех базовых пикселей p_{ij} изображения $\Omega^4 = \{d_{ij}^{mn} \in R\}$.

На следующем этапе производится построение функции распределения межпластиночных расстояний микроструктуры $P(d_{пл})$ для q интервалов дискретизации значений видимых межпластиночных расстояний $d_{пл}^1, d_{пл}^2, \dots, d_{пл}^q$, вычисляемых как $\left(0; \frac{3 \cdot \Delta d}{2}\right]$ мкм, $\left(\frac{3 \cdot \Delta d}{2}; \frac{5 \cdot \Delta d}{2}\right]$ мкм, ..., $\left(\frac{(2q-1) \cdot \Delta d}{2}; \frac{(2q+1) \cdot \Delta d}{2}\right]$ мкм, где Δd – шаг дискретизации видимых межпластиночных расстояний.

Разработанный алгоритм был реализован при разработке программного обеспечения «АОМ-1», позволяющего рассчитывать характеристики микроструктуры перлитных сталей [4]. Рассмотрим некоторые приложения разработанного метода в применении к задачам исследования микроструктур сталей металлургического производства.

Известно, что для выявления причин снижения механических свойств перлитной стали в производстве исследуют усредненное межпластиночное расстояние. Причем традиционный метод секущих для определения этой характеристики, используемый в практике металловедения, является трудоемким и имеет невысокую точность. К тому же субъективность выбора эвтектоидной колонии по изображению также влияет на точность получаемых данных. Альтернативным методом секущих является метод треугольников, развиваемый в настоящей работе и позволяющий автоматизировать процесс расчета межпластиночных расстояний. В этом методе, в отличие от традиционного метода секущих, определяется функция плотности распределения межпластиночных расстояний, позволяющая определять не только средневзвешенное расстояние, но и целый спектр этих расстояний в микроструктуре. На рисунке 1 представлены результаты обработки изображений микроструктур, полученные методом треугольников, для шести образцов перлитной стали. В качестве интегральной характеристики межпластиночных расстояний использована функция плотности их распределения в микроструктуре.

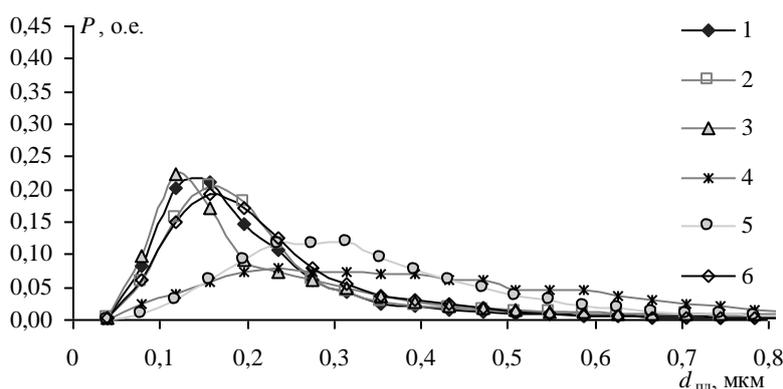


Рис. 1. Функции распределения значений межпластиночных расстояний для различных образцов с использованием метода треугольников: 1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3; 4 – образец № 4; 5 – образец № 5; 6 – образец № 6

В таблице 1 приведены значения средних межпластиночных расстояний, вычисленные на основе рассчитанных функций распределения, полученных с использованием двух методов: вышеописанного метода треугольников и традиционного метода секущих. Следует отметить, что в применении к данному объекту метод секущих основывался на 100 измерениях, в то же время метод треугольников, основанный на автоматизированной обработке, использует более десяти тысяч измерений.

Таблица 1

Значения средних межпластиночных расстояний для микроструктур различных образцов

Метод	Значения средних межпластиночных расстояний для микроструктур различных образцов, мкм					
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5	Образец № 6
Метод секущих	0,252	0,268	0,220	0,457	0,398	0,255
Метод треугольников	0,224	0,249	0,256	0,408	0,351	0,231
Δ , %	11,2	7,1	-16,5	10,7	11,7	9,4

Из таблицы 1 видно, что результаты определения межпластиночного расстояния, полученные обоими методами, могут различаться для данных неравновесных микроструктур, особенно при наличии широкого спектра эвтектидных колоний различной дисперсности. Это может свидетельствовать о том, что для сильно неравновесных структур применение традиционного метода может приводить к низкой точности определения межпластиночного расстояния стале.

Еще одним важным аспектом введения функции плотности распределения видимых межпластиночных расстояний $P(d_{пл})$ на основе изображений микроструктуры является возможность количественной параметризации структур. В качестве характеристик для параметризации микроструктуры на базе полученной функции распределения $P(d_{пл})$ предлагаются характеристики, представленные ниже.

- Параметр P_1 , характеризующий истинное межпластиночное расстояние микроструктур образца $d_{пл}^{ист}$, определяется по формуле:

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

$$\text{где } P(d_{пл}^k) = \max\{P(d_{пл}^n)\}; s_1 = \frac{P(d_{пл}^{k-1}) - P(d_{пл}^{k+1})}{2(P(d_{пл}^k) - P(d_{пл}^{k+1}))}; s_2 = \frac{P(d_{пл}^{k+1}) - P(d_{пл}^{k-1})}{2(P(d_{пл}^k) - P(d_{пл}^{k-1}))}.$$

- Параметр P_2 , характеризующий среднее видимое межпластиночное расстояние образца, определяется по формуле:

$$P_2 = \sum_{k=1}^q P(d_{пл}^k) \cdot d_{пл}^k.$$

- Параметр P_3 , характеризующий долю цементитных пластин образца микроструктуры, определяется по формуле:

$$P_3 = \frac{\sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} N_{ij}^3}{L_x \cdot L_y}.$$

- Параметры $P_4 \dots P_{13}$, характеризующие доли видимых межпластиночных расстояний микроструктуры в диапазоне от минимального расстояния до s_i , где $s_i = 0,04; 0,08; 0,12; 0,16; 0,20; 0,24; 0,32; 0,48; 0,64; 1,04$ мкм; $i = 4, 13$; параметры вычисляются по формуле: $P_i = \sum_{k=1}^{t_i} P(d_{пл}^k)$, $t_i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 16, 26$.

- Параметр P_{14} , характеризующий минимальное видимое межпластиночное расстояние среди 10 % максимальных расстояний микроструктуры, вычисляется по формуле: $P_{14} = d_s^z$, где d_s^z – z -й член ряда $D_n = d_s^1, d_s^2, \dots, d_s^n$, который представляет собой отсортированный ряд видимых межпластиночных расстояний микроструктуры; $z = 0,9 \cdot n$; $n = \sum_{l=1}^q P(d_{пл}^l)$.

- Параметр P_{15} , характеризующий среднее видимое межпластиночное расстояние среди 10 % максимальных расстояний микроструктуры, вычисляется по формуле: $P_{15} = \frac{\sum_{l=z}^n d_s^l}{0,1n}$.

- Параметр P_{16} , характеризующий минимальное видимое межпластиночное расстояние среди 20 % максимальных расстояний микроструктуры вычисляется по формуле: $P_{16} = d_s^y$, где d_s^y – y -й член ряда D_n ; $y = 0,8 \cdot n$.

- Параметр P_{17} , характеризующий среднее видимое межпластиночное расстояние среди 20 % максимальных расстояний микроструктуры, вычисляется по формуле: $P_{17} = \frac{\sum_{l=y}^n d_s^l}{0,2n}$.

- Параметр P_{18} , характеризующий высоту пика функции распределения межпластиночного расстояния $P(d_{пл})$, вычисляется по формуле: $P_{18} = \max\{P(d_{пл})\}$.

- Параметр P_{19} , характеризующий видимое межпластиночное расстояние, соответствующее пику функции распределения $P(d_{пл})$ и соответствующее преобладающему расстоянию микроструктуры.

- Параметр P_{20} , характеризующий площадь окрестности пика функции распределения межпластиночных расстояний $P(d_{пл})$, определяется по формуле: $\int_{d_1^{n-1}}^{d_1^{n+1}} P(d_{пл}) dP$.

Таким образом, используя представленный математический аппарат можно построить как функцию плотности распределения видимых межпластиночных расстояний $P(d_{пл})$, так и определить параметры этой функции для количественного описания этой микроструктуры.

В качестве объектов для обработки изображений были использованы микроструктуры катанки перлитной стали диаметром 5,5 мм, получаемой на РУП «Белорусский металлургический завод» (БМЗ). Для каждой из отобранных микроструктур, используя представленный математический аппарат, были рассчитаны функции плотности распределения $P(d_{пл})$. В исследовании было использовано два образца с различной дисперсностью перлита, каждый из которых разбивался на девять фрагментов. Обозначим фрагменты 1...9 образца № 1 как фрагменты с номерами 1...9, а фрагменты 1...9 образца № 2 как фрагменты с номерами 10...18. На рисунке 2 представлены полученные функции плотности распределения межпластиночных расстояний $P(d_{пл})$ для исследованных фрагментов.

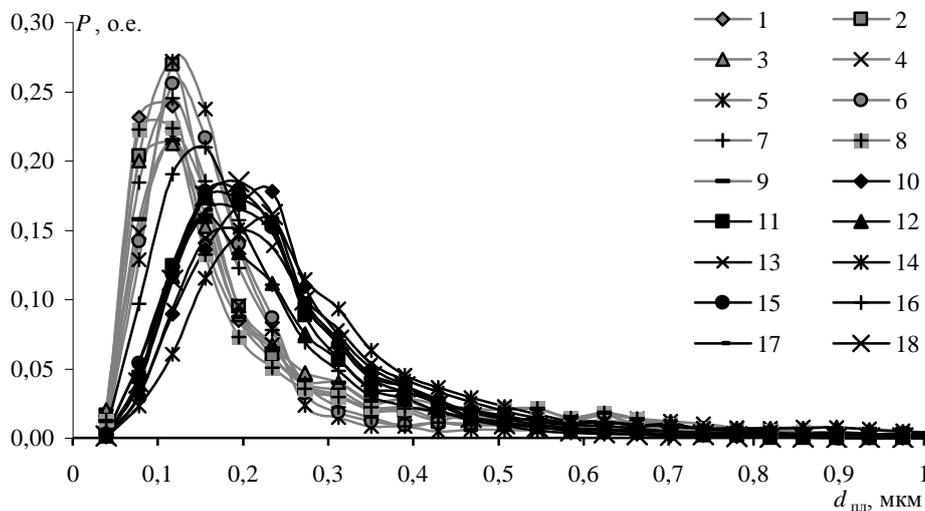


Рис. 2. Функции плотности распределения межпластиночных расстояний для восемнадцати фрагментов двух образцов микроструктур: 1... 9 – фрагменты с номерами 1... 9 образца № 1; 10... 18 – фрагменты с номерами 10... 18 образца № 2

Как видно из рисунка, для образца № 1 с меньшей дисперсностью, пики функций фрагментов смещены влево, в область меньших значений расстояний по сравнению с фрагментами образца № 2, для которого характерна большая дисперсность перлита.

На следующем этапе на основе рассчитанных функций распределения для фрагментов образцов микроструктур (рис. 2) были вычислены характеристики изображений (табл. 2, 3). Каждый из фрагментов был «вырезан» из общей микроструктуры, в тоже время он отличался от общей микроструктуры, так как был частью общей фотографии, а значит, имел свои особенности. Следует отметить, что сложность обработки неравновесных структур заключается в том, что они не периодичны в сечении XY.

Таблица 2

Вычисленные характеристики изображений микроструктур для фрагментов образца № 1

Параметр	Значения параметров изображения для девяти фрагментов образца № 1								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_1 , мкм	0,099	0,111	0,102	0,125	0,132	0,130	0,117	0,098	0,118
P_2 , мкм	0,206	0,185	0,212	0,252	0,200	0,195	0,196	0,235	0,240
P_3 , %	0,240	0,269	0,212	0,217	0,272	0,256	0,245	0,223	0,215
P_4 , %	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117
P_5 , %	0,612	0,646	0,565	0,541	0,638	0,615	0,615	0,578	0,532
P_6 , %	0,689	0,712	0,779	0,732	0,700	0,684	0,724	0,739	0,711
P_7 , %	0,013	0,017	0,020	0,015	0,007	0,007	0,013	0,012	0,012
P_8 , %	0,244	0,220	0,220	0,164	0,136	0,149	0,197	0,235	0,169
P_9 , %	0,484	0,490	0,433	0,380	0,408	0,405	0,442	0,458	0,384
P_{10} , %	0,624	0,663	0,585	0,557	0,645	0,622	0,628	0,591	0,544
P_{11} , %	0,709	0,758	0,674	0,652	0,782	0,761	0,750	0,663	0,631
P_{12} , %	0,766	0,817	0,741	0,719	0,861	0,848	0,828	0,714	0,696
P_{13} , %	0,839	0,885	0,828	0,785	0,900	0,899	0,890	0,779	0,777
P_{14} , мкм	0,914	0,945	0,912	0,857	0,927	0,941	0,933	0,864	0,877
P_{15} , мкм	0,962	0,981	0,968	0,911	0,953	0,971	0,967	0,939	0,951
P_{16} , мкм	0,998	1,000	1,000	0,991	0,995	0,997	0,997	0,995	0,997
P_{17} , мкм	0,468	0,351	0,390	0,585	0,351	0,351	0,351	0,546	0,546
P_{18} , %	0,312	0,234	0,273	0,351	0,234	0,234	0,234	0,351	0,351
P_{19} , мкм	0,478	0,341	0,438	0,616	0,408	0,333	0,362	0,563	0,506
P_{20} , %	0,507	0,472	0,566	0,544	0,461	0,425	0,442	0,519	0,460

Таблица 3

Вычисленные характеристики изображений микроструктур для фрагментов образца № 2

Параметр	Значения параметров изображения для девяти фрагментов образца № 2								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
P_1 , мкм	0,217	0,175	0,164	0,186	0,219	0,176	0,144	0,177	0,184
P_2 , мкм	0,268	0,268	0,371	0,288	0,298	0,232	0,204	0,239	0,234
P_3 , %	0,178	0,174	0,16	0,151	0,158	0,179	0,210	0,165	0,185
P_4 , %	0,234	0,156	0,156	0,195	0,234	0,195	0,156	0,195	0,195
P_5 , %	0,455	0,471	0,411	0,433	0,419	0,508	0,557	0,478	0,521
P_6 , %	0,415	0,411	0,374	0,375	0,352	0,44	0,539	0,466	0,412
P_7 , %	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,005	0,002	0,002
P_8 , %	0,032	0,045	0,040	0,031	0,024	0,057	0,102	0,057	0,041
P_9 , %	0,121	0,170	0,157	0,124	0,085	0,175	0,292	0,181	0,155
P_{10} , %	0,257	0,344	0,317	0,268	0,200	0,352	0,502	0,345	0,330
P_{11} , %	0,425	0,516	0,451	0,419	0,347	0,531	0,659	0,510	0,514
P_{12} , %	0,603	0,671	0,562	0,557	0,505	0,683	0,769	0,658	0,675
P_{13} , %	0,786	0,817	0,694	0,735	0,712	0,847	0,887	0,822	0,845
P_{14} , мкм	0,920	0,914	0,808	0,889	0,886	0,963	0,972	0,952	0,965
P_{15} , мкм	0,967	0,946	0,859	0,944	0,949	0,990	0,992	0,988	0,991
P_{16} , мкм	0,997	0,978	0,927	0,992	0,995	1,000	1,000	1,000	1,000
P_{17} , мкм	0,429	0,429	0,858	0,507	0,507	0,390	0,312	0,390	0,390
P_{18} , %	0,351	0,312	0,468	0,390	0,390	0,312	0,234	0,312	0,312
P_{19} , мкм	0,487	0,490	0,935	0,541	0,507	0,403	0,270	0,376	0,365
P_{20} , %	0,587	0,499	0,484	0,525	0,507	0,501	0,473	0,532	0,491

На следующем этапе проводилась оценка близости фрагментов неравновесных микроструктур образцов на основе метода таксономии. Причем каждый фрагмент характеризовался набором из двадцати параметров и представлял собой таксон в двадцатимерном пространстве. На рисунке 3 представлены результаты решения задачи таксономии.

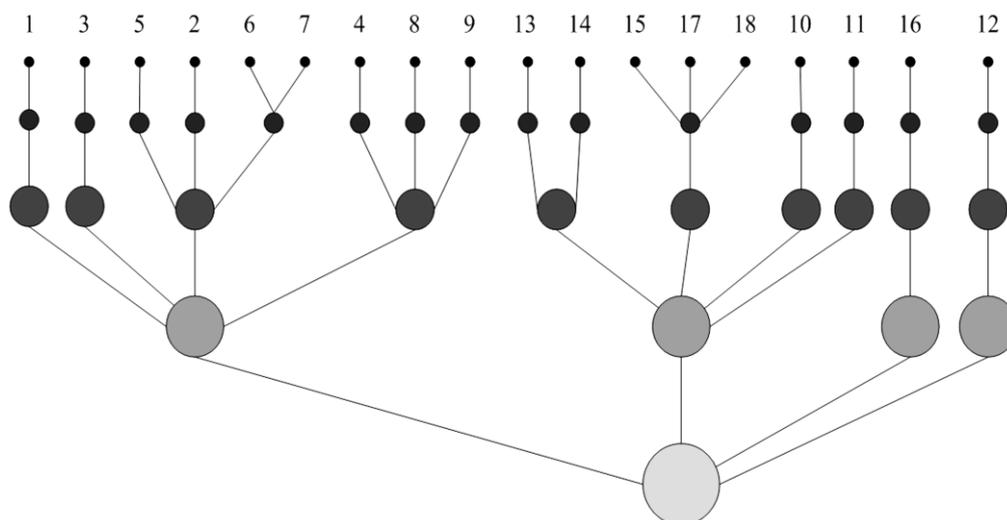


Рис. 3. Распределение таксонов по восемнадцати фрагментам микроструктур

Как видно из рисунка, для первого уровня близкими фрагментами являются 6-7, 15-17-18. Для второго уровня в таксон могут быть объединены фрагменты 5-2-6-7, 4-8-9, 13-14. Для третьего уровня близкими являются 1-3-5-2-6-7-4-8-9, 13-14-15-17-18-10-11. Из представленных результатов можно заметить следующую закономерность, фрагменты 1-3-5-2-6-7-4-8-9, характеризующие микроструктуру образца № 1, образуют единый таксон, что свидетельствует о близости первичных фрагментов микроструктур. Фрагменты 13-14-15-17-18-10-11 также могут быть включены в единый таксон, характеризуемый параметрами таблицы. Следует отметить, что фрагменты 16 и 12 несколько отклоняются от общей закономерности, что может свидетельствовать о нетипичной микроструктуре выбранной для исследования.

Данное исследование носит статистический характер и при использовании классификации в задачах необходимо проводить некоторое усреднение. В целом использование параметров функции плотности распределения показывает возможность классификации микроструктур, которые визуальнo плохо различимы с точки зрения дисперсности перлита.

Таким образом, на основе метода таксономии показано, что микроструктуры могут быть разделены на два класса с помощью интегральных параметров, которые могут быть положены в основу объяснения закономерностей, формирующихся в микроструктуре под действием факторов химического состава и технологии, что имеет важное значение для исследования взаимосвязей типа «структура – свойства» для сталей перлитного класса.

Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для решения прикладных задач, связанных с исследованием взаимосвязей между свойствами сплава и его микроструктурой. Методы математического моделирования, развиваемые в настоящей статье, позволяют решать такого типа задачи. Для иллюстрации этой задачи были отобраны микроструктуры двух вариантов катанки, из которой изготавливают бортовую проволоку в металлургическом производстве. Первый вариант катанки (условно обозначим «катанка А») имеет микроструктуру, при которой в изготавливаемой из нее бортовой проволоке не образуется дефект типа «расслой». Вторая группа катанки (условно обозначим «катанка Б») имеет микроструктуру перлитной стали, при которой в изготавливаемой из нее бортовой проволоке, образуется дефект типа «расслой».

Анализ дефекта «расслой» на основе традиционного микроструктурного анализа показал, что в микроструктуры образцов катанки, для которой дефект «расслой» проявляется и не проявляется, практически не различимы. Однако компьютерный анализ изображений микроструктур катанки А и Б, показал, что математические модели, представленные в виде функции плотности распределения межпластиночных расстояний этих микроструктур, являются разными и их можно условно разделить на два класса: первый класс включает микроструктуры катанки, приводящей к расслою проволоки; второй класс – микроструктуры катанки, не приводящей к расслою.

Для каждой из отобранных микроструктур катанки условных классов А и Б были рассчитаны функции распределения межпластиночных расстояний (рис. 4).

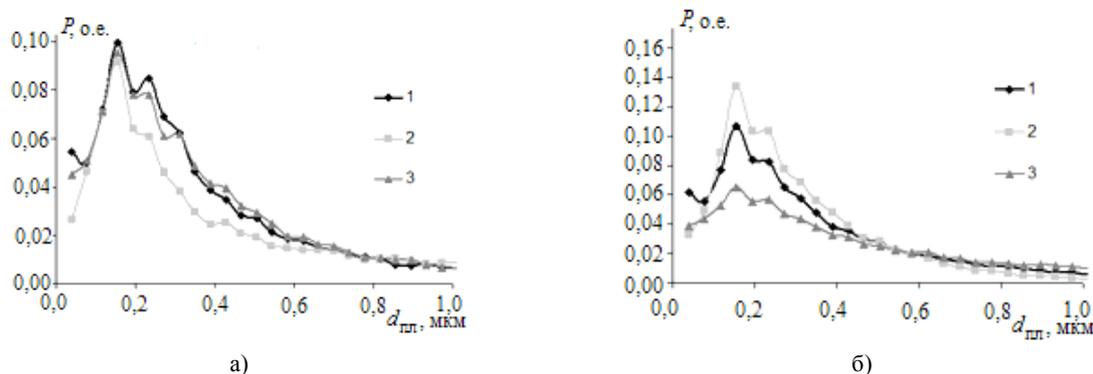


Рис. 4. Функции распределения межпластиночных расстояний
эвтектоидных колоний микроструктур (1, 2, 3) для двух групп катанки:
а – в проволоке не образуется дефект типа «расслой»; б – в проволоке образуется дефект типа «расслой»

Заключение. Представленный подход к исследованию микроструктур сталей на основе функции распределения межпластиночных расстояний может быть использован для решения прикладных задач металловедения по выявлению количественных особенностей в изменении характеристик микроструктуры, что имеет важное теоретическое и практическое значение для металлургии стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочвар, А.А. Металловедение / А.А. Бочвар. – М.: Metallurgizdat, 1956. – 494 с.
2. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография / С.А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
3. О новых математических методах анализа микроструктур эвтектоидных колоний перлитных сталей / А.Н. Чичко [и др.] // Литье и металлургия (раздел САПР). – 2008. – № 4. – С. 104 – 112.
4. Свидетельство о регистрации компьютерной программы АОМ-1 № 085 / авторы Чичко А.Н., Сачек О.А., Лихоузов С.Г., Веденеев А.В., Барадынцева Е.П., Соболев В.Ф.; заявка № С20090028, зарегистр. 16.06.2009 в Нац. центре интеллектуальной собственности.

Поступила 03.03.2010

ABOUT METHODS OF THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MICROSTRUCTURES IMAGES OF PEARLITIC STEELS

A. CHICHKO, O. SACHEK

The method for the mathematical description of microstructures of the pearlitic steels, based on processing of images and accounts of density function of distribution of distances between pearlite plates is offered. With use of the given method characteristics of rod microstructures of the pearlitic steels, used in metallurgical production for manufacturing of a bead wire are investigated. It is shown that use of an offered technique for account of averaged distances between pearlite plates in eutectoid colonies of the pearlitic steels allows to eliminate the subjective factor at a colony choice, to lower time of processing of a microstructure, to automate definition process of distances in comparison with a traditional method. The group of integrated parameters for the quantitative description of microstructures of a pearlitic steel on the basis of significances of distribution function of distances between pearlite plates is offered. On the basis of a taxonomy method it is shown that microstructures of the pearlitic steels can be divided into various classes by means of characteristics of images. Ways of use of density function of distribution for research of interrelations between characteristics of a microstructure and properties of a pearlitic steel are shown.