

**Технология,
оборудование, САПР
и экология литейного
производства**

It is shown that spectral characteristics of functions of closeness of the pearlite inter-plate distances, determined by image of the rolled wire samples microstructures, correlate with its mechanical characteristics and also with characteristics of wire, produced of it.

А. Н. ЧИЧКО, О. А. САЧЕК, БНТУ, А. В. ВЕДЕНЕЕВ, РУП «БМЗ», В. Ф. СОБОЛЕВ, БНТУ

УДК 669.27:519

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ
СПЕКТРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗОБРАЖЕНИЯ
МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ И ЕЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ
СВОЙСТВАМИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ**

Известно, что исследование микроструктур сплавов с целью изучения механических свойств является одной из важнейших задач металлургии [1]. Как правило, изображение микроструктуры сплава формируется от его фазовых составляющих в отраженном свете, если микроскоп световой, и во вторичных электронах, если микроскоп электронный [2]. Полученные с помощью методов световой или электронной микроскопии изображения по форме представляют собой сложное плоскостное многопиксельное изображение, по которому можно оценивать размеры зерен и фазовых составляющих [3]. В настоящей статье развиваются математические методы обработки изображений микроструктур перлитных сталей, позволяющие на количественном уровне сравнивать микроструктуры одного класса между собой, что позволяет предложить новые методы для разработки взаимосвязей между характеристиками структуры и свойствами сплава [4].

Цель настоящей статьи – исследование взаимосвязей между характеристиками микроструктуры, определенными на основе ее компьютерного изображения, и свойствами промышленных объектов (катанка, проволока), изготавливаемых на РУП «БМЗ».

Для реализации этой цели были отобраны промышленные данные, с одной стороны, по механическим свойствам катанки, с другой – соответствующие им микроструктуры. На рис. 1 показана схема получения микроструктур для компьютерной обработки с целью определения спектральных характеристик межпластиночного расстояния в перлитной стали. Для исследования были отобраны микроструктуры катанки для 10 различных плавки. Для каждой плавки были взя-

ты фотографии для трех бунтов – 10, 30 и 60. Для каждого бунта отобрано не менее чем по 20 фотографий микроструктуры. Таким образом, всего в расчетах использовались не менее чем $20 \cdot 3 \cdot 10 = 600$ фотографий микроструктур. Фотографии были сделаны на микроскопе при увеличении 4000. Образцы № 1–3 соответствуют плавке № 304804, образцы № 4–6 – № 304805, образцы № 7–9 – № 304817, образцы № 10–12 – № 300004, образцы № 13–15 – № 300242, образцы № 16–18 – № 300360, образцы № 19–21 – № 305641, образцы № 22–24 – № 305643, образцы № 25–27 – № 305646, образцы № 28–30 – плавке № 306065.

На рис. 2, 3 показаны фотографии микроструктур образцов катанки. Каждая из микроструктур соответствовала своим технологическим условиям и соответствующему номеру плавки. Для каждого образца приведены фотографии крайних и центральных участков поперечного сечения катанки.

Образцы представляли собой катанку диаметром 5,5 мм из сталей 80 БВ, 80К. В последующем из нее изготавливали бортовую проволоку в условиях производства РУП «БМЗ». Каждому образцу катанки ставили в соответствие группу техноло-

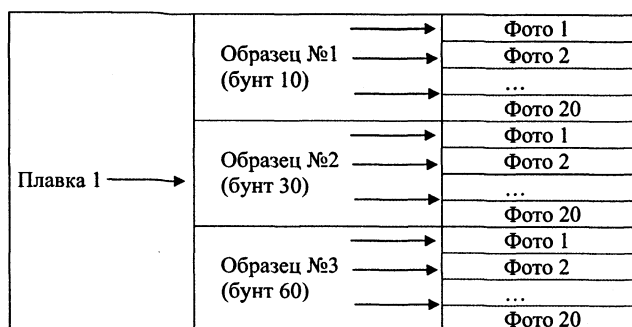


Рис. 1. Схема получения микроструктур для исследования

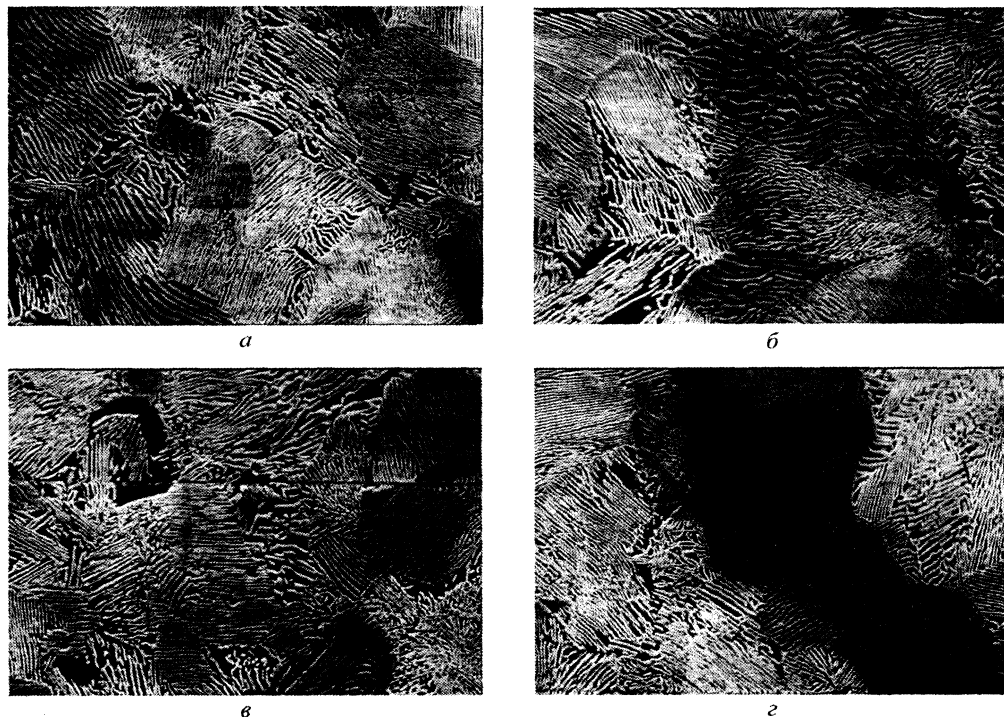


Рис. 2. Микроструктура перлитной стали для различных участков образца № 1: а, б – крайние участки поперечного сечения катанки; в, г – центральные участки поперечного сечения катанки

гических параметров и ее механических свойств. Фотографии микроструктур образцов приведены на рисунках. Для каждого образца приведены по две фотографии крайних участков и по две центральных участков поперечного сечения катанки образца.

Анализ всех представленных микроструктур показывает, что в них можно выделить несколько групп колоний с различным уровнем дисперсности межпластиночного перлита. С технологической точки зрения это может быть связано с тем, что образцы на разных участках в процессе прохождения технологической цепочки охлаждаются с различной скоростью. Как известно, в зависимости от скорости охлаждения эвтектоидное превращение аустенит- \rightarrow перлит (феррит+цементит) может иметь и другие продукты распада, приводящие к образованию троостита, сорбита и бейнита, которые фактически являются одной из форм эвтектоидного превращения для различных скоростей охлаждения аустенита. На микроструктурах можно выделить различные участки в зависимости от степени освещенности, что связано со сложным пространственным распределением феррита и цементита. Следует отметить, что микроструктуры (рис. 2, 3) даже для одного образца различаются между собой, что свидетельствует о статистическом характере распределения параметров микроструктуры, подчиняющимся недетерминированным законам охлаждения заготовки.

Образцы взяты из катанки, которая получилась в результате из литой заготовки. При этом свойства литой заготовки и ее структура трансформируются под действием различного уровня обжатий в микроструктуру (рис. 2, 3). Зерна в данной микроструктуре выявляются недостаточно четко, что не позволяет такую характеристику как «площадь зерна» использовать в качестве характеристики микроструктуры.

Для обработки микроструктур можно предложить математическое описание в виде функции плотности распределения межпластиночных расстояний. Пусть $H_P(d_{пл})$ является функцией, характеризующей распределение межпластиночных расстояний на видимой плоскости микрошлифа. Тогда изображение микроструктуры может быть аппроксимировано этой функцией распределения, т. е. речь идет о построении математической модели конкретной микроструктуры и замене реальной микроструктуры образца стали функцией описывающей распределение межпластиночных расстояний.

На рис. 4 показаны этапы математической формализации микроструктуры, заключающиеся в замене ее множеством характеристик, отражающих особенности распределения межпластиночных расстояний эвтектоидной колонии. На последующих этапах эти характеристики будут использоваться для установления взаимосвязей характеристик микроструктуры со свойствами стали

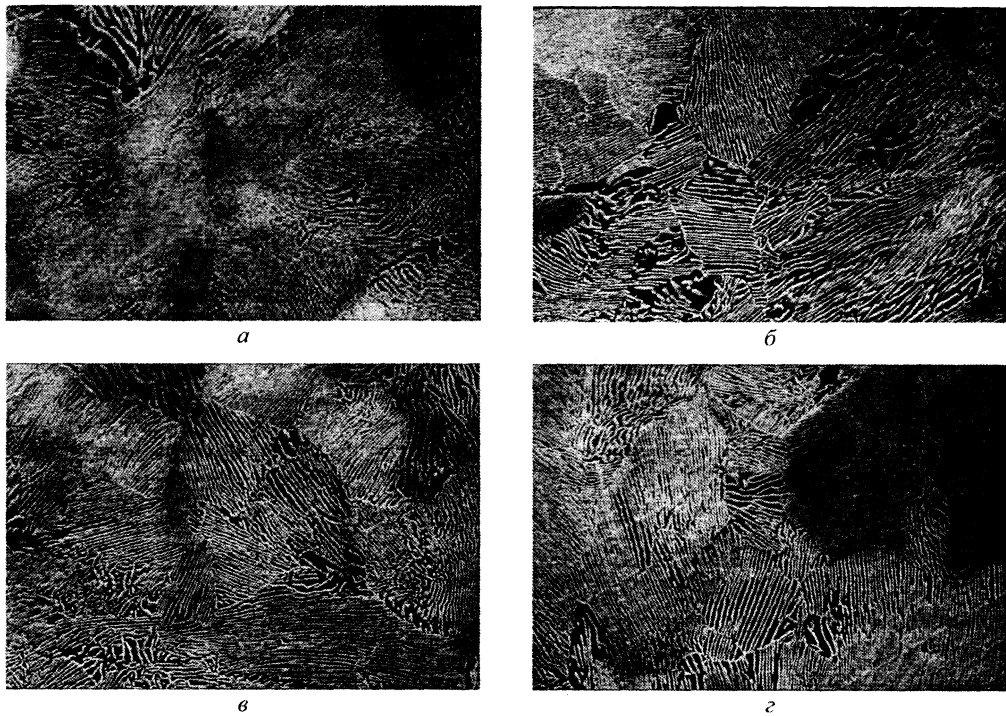


Рис. 3. Микроструктура перлитной стали для различных участков образца № 2: а, б – крайние участки поперечного сечения катанки; в, г – центральные участки поперечного сечения катанки

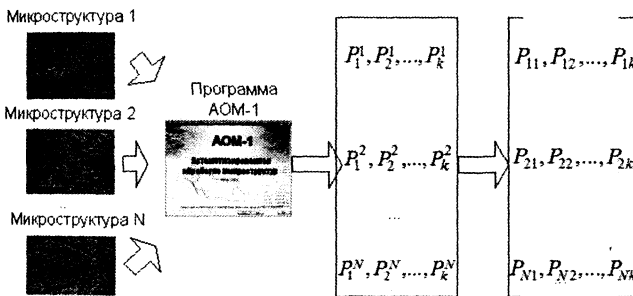


Рис. 4. Этапы преобразования изображения микроструктуры в систему числовых характеристик

Введем следующие обозначения для свойств проволоки: параметр «разрывное усилие» ($СП_1$), «относительное удлинение» ($СП_2$), «число скручиваний» ($СП_3$), «расслой» ($СП_4$). Значения свойств проволоки, полученной из исследуемой катанки, приведены в табл. 1.

В качестве характеристик слитка использовали следующие величины: «предел прочности» ($СК_1$), «относительное сужение» ($СК_2$), «относительное удлинение» ($СК_3$), «минимальное содержание углерода» ($СК_4$), «максимальное содержание углерода» ($СК_5$), «содержание кремния» ($СК_6$), «содержание марганца» ($СК_7$), «содержание фосфора» ($СК_8$), «содержание серы» ($СК_9$), «содержание хрома» ($СК_{10}$), «содержание никеля» ($СК_{11}$), «содержание меди» ($СК_{12}$), «содержание алюминия» ($СК_{13}$), «содержание азота» ($СК_{14}$), «максимальная масса окалины» ($СК_{15}$), «максимальная толщина обезуглероженного слоя» ($СК_{1,г}$), «балл

Таблица 1. Значения свойств проволоки, изготовленной из исследуемых образцов катанки

Номер образца	$СП_1, Н$	$СП_2, \%$	$СП_3$	$СП_4, \%$
1	4028,91	7,93	40,03	0
2	4028,91	7,93	40,03	0
3	4028,91	7,93	40,03	0
4	4046,65	8,00	39,52	0
5	4046,65	8,00	39,52	0
6	4046,65	8,00	39,52	0
7	4317,94	7,93	35,95	1
8	4317,94	7,93	35,95	1
9	4317,94	7,93	35,95	1
10	4170,84	8,04	31,06	15
11	4170,84	8,04	31,06	15
12	4170,84	8,04	31,06	15
13	4435,76	7,82	31,91	20
14	4435,76	7,82	31,91	20
15	4435,76	7,82	31,91	20
16	4279,98	7,83	32,53	15
17	4279,98	7,83	32,53	15
18	4279,98	7,83	32,53	15
19	4366,67	7,73	39,22	0
20	4366,67	7,73	39,22	0
21	4366,67	7,73	39,22	0
22	4408,46	7,68	39,58	0
23	4408,46	7,68	39,58	0
24	4408,46	7,68	39,58	0
25	4367,75	7,71	36,20	7
26	4367,75	7,71	36,20	7
27	4367,75	7,71	36,20	7
28	4365,90	7,42	36,15	5
29	4365,90	7,42	36,15	5
30	4365,90	7,42	36,15	5

перлита» (CK_{17}), «процент перлита» (CK_{18}). Значения параметров слитков, из которых была получена катанка, приведены в табл. 2. Данные таблицы использовали в качестве основной матрицы для статистического исследования.

В качестве спектральных характеристик межпластиночных расстояний микроструктур, вычисленных на основе функции плотности вероятности $H_P(d_{пл})$, были использованы следующие параметры:

• параметр P_1 «истинное межпластиночное расстояние»:

$$P_1 = \begin{cases} \frac{d_{пл}^k - d_{пл}^1}{n} s_1, & \text{если } H(d_{пл}^{k-1}) > H(d_{пл}^{k+1}), \\ \frac{d_{пл}^k + d_{пл}^1}{n} s_2, & \text{если } H(d_{пл}^{k-1}) \leq H(d_{пл}^{k+1}), \end{cases}$$

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

$$s_2 = \frac{H(d_{пл}^{k+1}) - H(d_{пл}^{k-1})}{2(H(d_{пл}^k) - H(d_{пл}^{k-1}))}$$

• параметр P_2 «площадь окрестности пика функции распределения межпластиночных расстояний $H_P(d_{пл})$ »:

$$d_1^{P_{19}+1} \int_{d_1^{P_{19}-1}} H_P(d_{пл}) dH_P ;$$

• параметр P_3 «доля цементитных пластин микроструктуры»:

$$\frac{\sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} N_{ij}}{L_x L_y},$$

где 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; $N_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } N_{ij}^1 \leq \beta \\ 1, & \text{если } N_{ij}^1 > \beta \end{cases}$, где

$$N_{ij}^1 = \frac{255^2 r + 255g + b}{16646655}, \text{ где } r, g, b \in [0, 255] \text{ – уровни}$$

соответственно красного, зеленого и синего в палитре RGB; β – выбранный порог бинаризации изображения;

Таблица 2. Экспериментальные значения характеристик слитка

Номер образца	Характеристика слитка																
	CK_1	CK_2	CK_3	CK_4	CK_5	CK_6	CK_7	CK_8	CK_9	CK_{10}	CK_{11}	CK_{12}	CK_{13}	CK_{14}	CK_{15}	CK_{16}	CK_{17}
1	1075	41,5	15,50	0,78	0,79	0,19	0,29	0,005	0,010	0,19	0,05	0,09	0,001	0,005	0	0,05	2,0
2	1075	40,0	15,75	0,78	0,79	0,19	0,29	0,005	0,010	0,19	0,05	0,09	0,001	0,005	0	0,05	2,0
3	1080	41,0	15,25	0,78	0,79	0,19	0,29	0,005	0,010	0,19	0,05	0,09	0,001	0,005	0	0,05	2,0
4	1110	42,5	14,75	0,77	0,79	0,21	0,30	0,005	0,015	0,1785	0,04	0,08	0,001	0,006	0	0,06	2,0
5	1105	41,5	14,75	0,77	0,79	0,21	0,30	0,005	0,015	0,1785	0,04	0,08	0,001	0,006	0	0,06	2,0
6	1100	45,0	16,25	0,77	0,79	0,21	0,30	0,005	0,015	0,1785	0,04	0,08	0,001	0,006	0	0,06	2,0
7	1135	39,5	–	0,82	0,82	0,22	0,52	0,005	0,009	0,02	0,03	0,05	0,001	0,005	0	0,05	2,0
8	1125	37,5	–	0,82	0,82	0,22	0,52	0,005	0,009	0,02	0,03	0,05	0,001	0,005	0	0,05	2,0
9	1110	37,5	–	0,82	0,82	0,22	0,52	0,005	0,009	0,02	0,03	0,05	0,001	0,005	0	0,05	2,0
10	1150	39,0	15,50	0,82	0,83	0,19	0,51	0,004	0,015	0,04	0,04	0,07	0,001	0,004	3	0,05	1,5
11	1145	40,0	16,25	0,82	0,83	0,19	0,51	0,004	0,015	0,04	0,04	0,07	0,001	0,004	3	0,05	1,5
12	1140	39,5	16,25	0,82	0,83	0,19	0,51	0,004	0,015	0,04	0,04	0,07	0,001	0,004	3	0,05	1,5
13	1145	41,0	14,25	0,82	0,84	0,18	0,30	0,006	0,014	0,20	0,04	0,07	0,001	0,006	4	0,04	1,5
14	1155	40,5	15,00	0,82	0,84	0,18	0,30	0,006	0,014	0,20	0,04	0,07	0,001	0,006	4	0,04	1,5
15	1155	40,0	15,00	0,82	0,84	0,18	0,30	0,006	0,014	0,20	0,04	0,07	0,001	0,006	4	0,04	1,5
16	1135	40,0	14,25	0,82	0,84	0,21	0,56	0,005	0,011	0,03	0,03	0,09	0,001	0,005	2	0,05	2,0
17	1130	41,5	13,50	0,82	0,84	0,21	0,56	0,005	0,011	0,03	0,03	0,09	0,001	0,005	2	0,05	2,0
18	1135	40,5	13,50	0,82	0,84	0,21	0,56	0,005	0,011	0,03	0,03	0,09	0,001	0,005	2	0,05	2,0
19	1165	42,5	14,25	0,79	0,80	0,2	0,30	0,005	0,014	0,21	0,04	0,08	0,001	0,005	0	0,04	2,0
20	1150	40,5	13,50	0,79	0,80	0,2	0,30	0,005	0,014	0,21	0,04	0,08	0,001	0,005	0	0,04	2,0
21	1150	40,5	13,50	0,79	0,80	0,2	0,30	0,005	0,014	0,21	0,04	0,08	0,001	0,005	0	0,04	2,0
22	1165	41,5	14,25	0,79	0,80	0,23	0,30	0,005	0,016	0,23	0,04	0,09	0,001	0,005	0	0,04	2,0
23	1170	40,5	14,25	0,79	0,80	0,23	0,30	0,005	0,016	0,23	0,04	0,09	0,001	0,005	0	0,04	2,0
24	1150	41,0	15,50	0,79	0,80	0,23	0,30	0,005	0,016	0,23	0,04	0,09	0,001	0,005	0	0,04	2,0
25	1125	38,0	14,25	0,78	0,81	0,22	0,31	0,004	0,013	0,21	0,04	0,08	0,001	0,005	4	0,03	2,0
26	1130	39,5	14,25	0,78	0,81	0,22	0,31	0,004	0,013	0,21	0,04	0,08	0,001	0,005	4	0,03	2,0
27	1140	40,5	14,00	0,78	0,81	0,22	0,31	0,004	0,013	0,21	0,04	0,08	0,001	0,005	4	0,03	2,0
28	1130	44,0	13,75	0,80	0,81	0,23	0,28	0,004	0,010	0,21	0,05	0,08	0,001	0,005	0	0,05	0
29	1145	40,5	14,75	0,80	0,81	0,23	0,28	0,004	0,010	0,21	0,05	0,08	0,001	0,005	0	0,05	0
30	1140	38,0	15,00	0,80	0,81	0,23	0,28	0,004	0,010	0,21	0,05	0,08	0,001	0,005	0	0,05	0

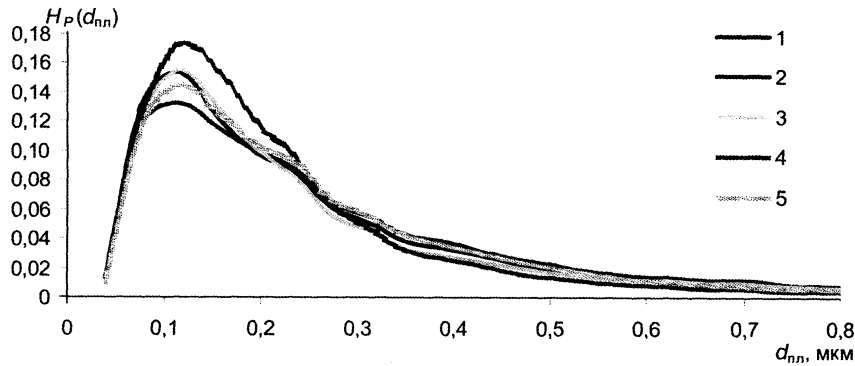


Рис. 5. Функции распределения $H_P(d_{пл})$ для образцов № 1–5 (табл. 3): 1 – образец № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5

• группа параметров P_4-P_{13} , характеризующих доли видимых межпластиночных расстояний различного диапазона «10·i% площади распределения $H_P(d_{пл})$ »:

$$\int_{d_{min}}^{d_i} H_P(d_{пл}) dH_P,$$

где $d_i = (d_{max} - d_{min}) / 10, i = 1, 10$;

• параметр P_{14} «видимое межпластиночное расстояние, соответствующее пику функции распределения $H_P(d_{пл})$ ».

С помощью программы АОМ-1 [5] по микроструктурам образцов катанки были рассчитаны функции распределения межпластиночных расстояний $H_P(d_{пл})$. На рис. 5 показаны функции $H_P(d_{пл})$ для образцов № 1–5. Аналогичные кривые были получены для остальных исследуемых образцов.

На основе данных спектральной функции распределения межпластиночных расстояний $H_P(d_{пл})$ были рассчитаны параметры микроструктур $P_1 - P_{31}$, приведенные в табл. 3.

Таблица 3. Значения рассчитанных спектральных характеристик микроструктур катанки

Номер образца	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
1	0,127	0,140	69,30	0,13	0,13	8,7	3,08	4,49	5,53	6,31	6,94	7,5	1,05	7,97
2	0,112	0,171	74,12	0,14	0,13	8,33	3,14	4,48	5,42	6,16	6,75	7,24	1,11	7,66
3	0,124	0,177	67,13	0,15	0,14	8,11	3,26	4,55	5,41	6,05	6,59	7,05	1,17	7,45
4	0,120	0,167	66,54	0,15	0,14	7,98	3,29	4,57	5,42	6,04	6,56	7	1,16	7,38
5	0,113	0,178	70,66	0,16	0,15	7,81	3,25	4,38	5,17	5,79	6,32	6,77	1,27	7,17
6	0,122	0,198	66,49	0,18	0,17	6,83	3,48	4,58	5,23	5,65	5,97	6,24	1,39	6,47
7	0,116	0,209	68,06	0,15	0,15	7,52	3,35	4,69	5,57	6,17	6,6	6,9	1,19	7,15
8	0,127	0,189	64,21	0,16	0,16	7,47	3,39	4,56	5,31	5,88	6,3	6,65	1,28	6,96
9	0,125	0,201	63,71	0,17	0,16	7,06	3,5	4,6	5,29	5,77	6,15	6,46	1,32	6,71
10	0,123	0,227	67,75	0,17	0,17	6,84	3,53	4,68	5,38	5,83	6,14	6,38	1,34	6,57
11	0,120	0,222	67,57	0,18	0,17	6,35	3,59	4,68	5,3	5,69	5,94	6,11	1,42	6,21
12	0,119	0,248	65,32	0,2	0,19	5,89	3,69	4,64	5,14	5,43	5,62	5,75	1,54	5,82
13	0,123	0,172	63,90	0,15	0,14	8,14	3,21	4,46	5,32	5,96	6,5	6,96	1,19	7,38
14	0,109	0,208	69,71	0,18	0,16	7,12	3,35	4,41	5,08	5,57	5,99	6,33	1,38	6,63
15	0,116	0,201	71,50	0,17	0,16	6,76	3,43	4,65	5,38	5,86	6,16	6,37	1,35	6,53
16	0,116	0,249	66,70	0,19	0,18	6,27	3,59	4,64	5,21	5,57	5,8	5,97	1,47	6,1
17	0,123	0,233	63,56	0,19	0,18	6,41	3,61	4,64	5,25	5,65	5,93	6,13	1,44	6,25
18	0,122	0,262	64,28	0,19	0,19	6,13	3,69	4,69	5,22	5,52	5,73	5,88	1,49	6
19	0,133	0,145	68,32	0,14	0,12	8,69	3,16	4,56	5,56	6,34	6,98	7,52	1,04	7,96
20	0,132	0,161	69,78	0,14	0,13	8,31	3,27	4,63	5,54	6,2	6,73	7,2	1,08	7,61
21	0,137	0,156	67,69	0,13	0,12	8,9	3,17	4,72	5,78	6,6	7,26	7,81	0,94	8,24
22	0,128	0,195	72,89	0,14	0,13	7,63	3,35	4,87	5,84	6,47	6,9	7,2	1,1	7,4
23	0,131	0,169	69,40	0,13	0,12	9,24	3,05	4,5	5,55	6,35	7,03	7,65	0,99	8,23
24	0,123	0,200	71,40	0,15	0,15	7,77	3,31	4,54	5,37	5,99	6,48	6,88	1,21	7,23
25	0,113	0,150	73,14	0,15	0,13	8,23	3,08	4,33	5,23	5,93	6,5	7,02	1,18	7,48
26	0,114	0,133	75,95	0,12	0,12	8,94	3,01	4,48	5,56	6,42	7,1	7,72	0,98	8,22
27	0,110	0,153	74,48	0,14	0,13	8,29	3,14	4,47	5,39	6,12	6,72	7,17	1,12	7,58
28	0,120	0,156	74,24	0,14	0,13	8,44	3,15	4,44	5,35	6,07	6,67	7,19	1,12	7,66
29	0,125	0,173	77,56	0,15	0,14	7,62	3,39	4,63	5,44	6,04	6,51	6,87	1,18	7,15
30	0,117	0,145	75,15	0,12	0,12	8,4	3,13	4,66	5,76	6,54	7,11	7,55	1,01	7,89

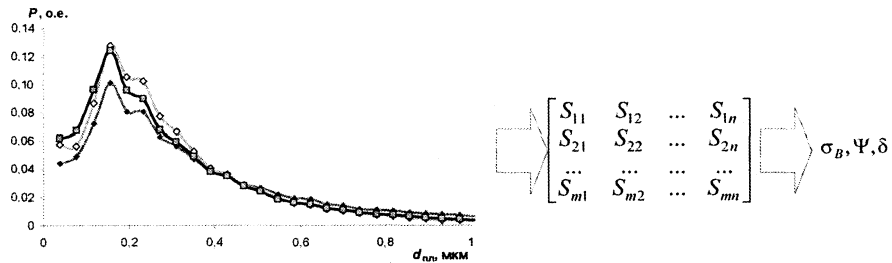


Рис. 6. Схема использования математической модели микроструктуры для анализа механических свойств

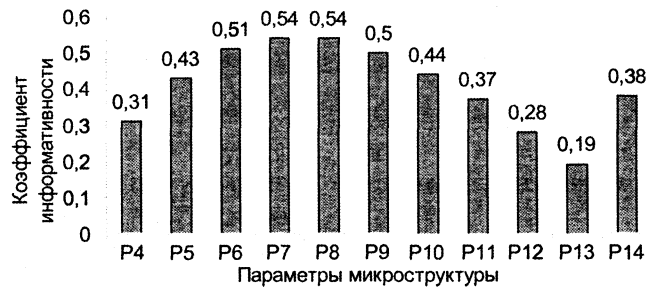


Рис. 7. Гистограмма коэффициентов информативности (парной корреляции) между временным сопротивлением и спектральными характеристиками микроструктуры



Рис. 8. Гистограмма коэффициентов информативности (парной корреляции) между относительным сужением и спектральными характеристиками микроструктуры

На рис. 6 показан подход, реализованный в настоящей работе.

Компьютерная обработка микроструктур катанки позволяет рассчитать функции плотности распределения доли эвтектоидных колоний по межпластиночным расстояниям $H_P(d_{пл})$. Затем для каждой функции распределения $H_P(d_{пл})$ рассчитывается матрица спектральных параметров, которая количественно характеризует микроструктуру катанки. На следующем этапе проводили исследование взаимосвязей между рассчитанной матрицей параметров и свойствами стали. Для поиска зависимостей между матрицей параметров микроструктур и свойствами стали был проведен корреляционный анализ данных и построены регрессионные зависимости между параметрами микроструктуры и механическими свойствами катанки.

Каждой микроструктуре ставили в соответствие механические свойства катанки. На рис. 7, 8 приведены результаты корреляционного анализа

(коэффициенты парной корреляции свойств катанки «временное сопротивление» и «относительное сужение» и интегральных параметров функции распределения межпластиночных расстояний перлитной стали). Как видно из рис. 7, наибольшие коэффициенты парной корреляции были получены между характеристиками «временное сопротивление» и параметрами P_6, P_7, P_8, P_9 . Это свидетельствует о взаимосвязи между временным сопротивлением проволоки и характеристиками микроструктуры. Для относительного сужения коэффициенты парной корреляции, как можно видеть из рис. 8, существенно меньше.

На следующем этапе был произведен анализ взаимосвязей между спектральными характеристиками микроструктуры катанки и свойствами проволоки. В табл. 4 приведена матрица корреляций между параметрами микроструктуры P_i , где $i = 1, 14$ и параметрами свойства проволоки $СП_1 - СП_4$.

При анализе результатов таблицы все параметры свойств проволоки были разделены на две

Таблица 4. Матрица корреляций между спектральными характеристиками микроструктуры и свойствами проволоки

Величина	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
$СП_1$	0,12	-0,10	0,23	-0,23	0,16	-0,21	-0,15	0,09	0,24	0,23	0,21	0,19	-0,20	0,17
$СП_2$	-0,11	0,45	-0,66	0,55	-0,46	0,51	0,44	0,04	-0,43	-0,50	-0,51	-0,49	0,53	-0,48
$СП_3$	0,34	-0,63	0,29	-0,66	0,69	-0,69	-0,62	-0,16	0,50	0,63	0,67	0,69	-0,66	0,70
$СП_4$	-0,39	0,56	-0,22	0,58	-0,61	0,63	0,51	0,05	-0,51	-0,60	-0,62	-0,63	0,61	-0,63

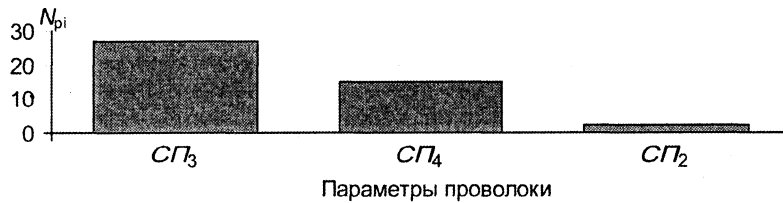


Рис. 9. Диаграмма Парето для анализа взаимосвязей между параметрами микроструктуры катанки и свойствами проволоки

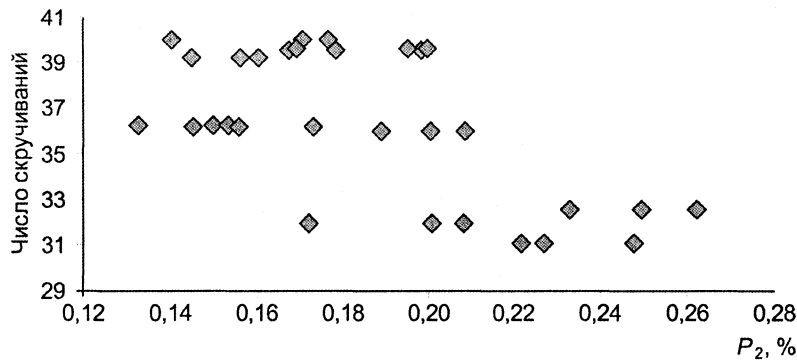


Рис. 10. Взаимосвязь числа скручиваний проволоки и спектральной характеристики микроструктуры катанки P_2

группы. В первую группу входили два свойства, наиболее сильно связанных со спектральными характеристиками микроструктуры, во вторую группу – два наименее взаимосвязанных с микроструктурами свойства проволоки (табл. 5).

Таблица 5. Группы степени взаимосвязей между спектральными характеристиками микроструктуры и свойствами проволоки

Параметры микроструктуры катанки	Первая группа параметров свойств проволоки	Вторая группа параметров свойств проволоки
P_1	$СП_4, СП_3$	$СП_2, СП_1$
$P_2, P_4, P_5, P_6, P_7, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}$	$СП_3, СП_4$	$СП_1, СП_2$
P_3	$СП_2, СП_3$	$СП_4, СП_1$
P_8	$СП_3, СП_1$	$СП_2, СП_4$
P_9	$СП_4, СП_3$	$СП_1, СП_2$

По данным таблицы была построена диаграмма Парето для анализа взаимосвязей между спектральными характеристиками микроструктуры катанки и свойствами катанки (рис. 9). Как видно из рисунка, свойства проволоки, которые имеют наиболее сильную взаимосвязь со спектральными характеристиками микроструктуры, – это число

скручиваний ($СП_3$) и относительное удлинение ($СП_4$).

Наиболее значимые взаимосвязи между параметрами микроструктур и параметрами свойств проволоки приведены на рис. 10–12. На рис. 10 показана взаимосвязь «числа скручиваний» и спектральной характеристики микроструктуры P_2 «площадь окрестности пика функции распределения межпластиночных расстояний $H_P(d_{пл})$ ». Как видно из рисунка, распределение точек можно условно разбить на две группы: первая группа соответствует высоким значениям числа скручиваний проволоки (36–40) и низким значениям спектральной характеристики микроструктуры (меньше 0,20), вторая группа – низким значениям числа скручиваний (31–32,5) и более высоким значениям спектральной характеристики микроструктуры (выше 0,2). Коэффициент корреляции взаимосвязи составляет $-0,63$.

На рис. 11 показана взаимосвязь параметра «относительное удлинение» и параметра микроструктуры P_3 «доля цементитных пластин микроструктуры». Как видно из рисунка, взаимосвязь имеет нечетко выраженную линейную тенденцию к увеличению значений параметра «относи-

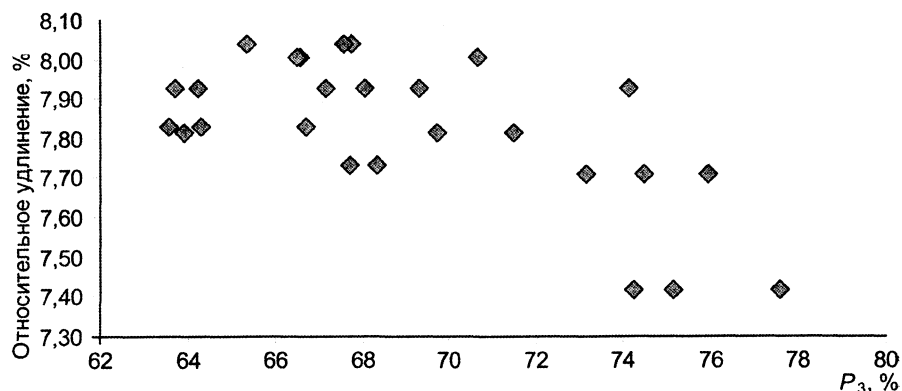


Рис. 11. Взаимосвязь относительного удлинения проволоки и параметра микроструктуры катанки P_3

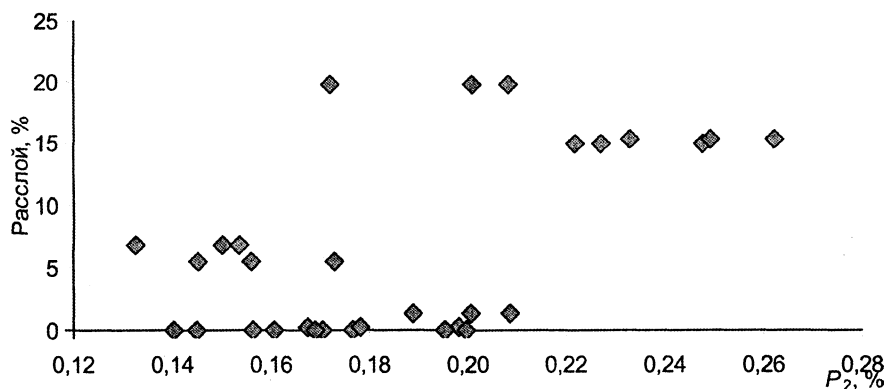


Рис. 12. Взаимосвязь величины расстоя проволоки и спектральной характеристики микроструктуры катанки P_2

Т а б л и ц а 6. Матрица корреляций между спектральными характеристиками микроструктуры и свойствами проволоки

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
CK_1	0,25	0,15	0,09	-0,03	-0,06	-0,03	0,11	0,34	0,22	0,11	0,04	0,00	0,01	-0,03
CK_2	0,15	-0,10	0,01	-0,07	0,10	-0,06	-0,07	-0,08	-0,02	0,01	0,04	0,06	0,00	0,08
CK_3	-0,26	0,20	-0,03	0,30	-0,31	0,32	0,23	-0,01	-0,26	-0,30	-0,31	-0,31	0,26	-0,31
CK_4	-0,01	0,67	-0,45	0,62	-0,64	0,59	0,65	0,37	-0,30	-0,49	-0,57	-0,61	0,58	-0,63
CK_5	-0,25	0,65	-0,36	0,64	-0,66	0,65	0,61	0,20	-0,44	-0,58	-0,64	-0,66	0,64	-0,67
CK_6	0,08	-0,20	0,38	-0,28	0,25	-0,31	-0,21	0,06	0,30	0,32	0,30	0,29	-0,34	0,28
CK_7	-0,01	0,78	-0,63	0,77	-0,72	0,68	0,76	0,38	-0,38	-0,58	-0,65	-0,68	0,68	-0,70
CK_8	0,12	0,15	-0,43	0,11	-0,06	0,11	0,06	-0,02	-0,11	-0,12	-0,11	-0,10	0,16	-0,08
CK_9	0,10	0,05	0,00	-0,01	-0,01	0,02	0,01	0,04	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	0,06	-0,01
CK_{10}	0,06	-0,75	0,66	-0,78	0,74	-0,71	-0,77	-0,36	0,42	0,61	0,68	0,71	-0,70	0,73
CK_{11}	-0,03	-0,59	0,63	-0,56	0,51	-0,50	-0,54	-0,26	0,30	0,44	0,49	0,50	-0,53	0,51
CK_{12}	0,08	-0,13	0,30	-0,22	0,23	-0,22	-0,22	-0,06	0,17	0,21	0,22	0,23	-0,19	0,24
CK_{13}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CK_{14}	-0,21	-0,24	0,00	-0,15	0,17	-0,08	-0,25	-0,36	-0,14	-0,02	0,06	0,10	-0,07	0,13
CK_{15}	-0,53	0,22	0,01	0,29	-0,32	0,37	0,16	-0,22	-0,42	-0,39	-0,37	-0,36	0,34	-0,34
CK_{16}	0,03	0,37	-0,38	0,45	-0,40	0,40	0,46	0,19	-0,26	-0,37	-0,40	-0,41	0,39	-0,41
CK_{17}	0,10	0,14	-0,46	0,12	-0,03	0,08	0,04	-0,03	-0,09	-0,09	-0,07	-0,05	0,14	-0,04

тельное удлинение» при уменьшении значений параметра микроструктуры. Коэффициент корреляции взаимосвязи равен $-0,66$.

На рис. 12 представлена взаимосвязь величины расстоя проволоки и спектральной характеристики микроструктуры P_2 «площадь окрестности пика функции распределения межпластиночных расстояний $H_P(d_{пл})$ ». Как видно из рисунка, груп-

па точек с величиной расстоя 15–20% соответствует области более высоких значений параметра микроструктуры (выше 0,20) и наоборот. Коэффициент корреляции взаимосвязи составляет 0,56.

На следующем этапе был проведен анализ взаимосвязей между спектральными характеристиками микроструктуры и свойствами катанки. В табл. 6 приведена матрица корреляций между

Таблица 7. Группы влияния свойств катанки на параметры микроструктуры

Параметр микроструктуры катанки	Первая группа параметров свойств катанки	Третья группа параметров свойств катанки
P_1	$CK_{15}, CK_3, CK_5, CK_1, CK_{14}$	$CK_{13}, CK_4, CK_7, CK_{11}, CK_{16}$
P_2	$CK_7, CK_{10}, CK_4, CK_5, CK_{11}$	$CK_{13}, CK_9, CK_2, CK_1, CK_{18}$
P_3	$CK_{10}, CK_{11}, CK_7, CK_{17}, CK_4$	$CK_9, CK_{13}, CK_{14}, CK_2, CK_{15}$
P_4	$CK_{10}, CK_7, CK_5, CK_4, CK_{11}$	$CK_{13}, CK_9, CK_1, CK_2, CK_8$
P_5	$CK_{10}, CK_7, CK_5, CK_4, CK_{11}$	$CK_{13}, CK_9, CK_{17}, CK_1, CK_8$
P_6	$CK_{10}, CK_7, CK_5, CK_4, CK_{11}$	$CK_{13}, CK_9, CK_1, CK_2, CK_{14}$
P_7	$CK_{10}, CK_7, CK_4, CK_5, CK_{11}$	$CK_{13}, CK_9, CK_{17}, CK_8, CK_2$
P_8	$CK_7, CK_4, CK_{10}, CK_{14}, CK_1$	$CK_{13}, CK_3, CK_8, CK_{17}, CK_9$
P_9	$CK_5, CK_{15}, CK_{10}, CK_7, CK_{11}$	$CK_9, CK_{13}, CK_2, CK_{17}, CK_8$
P_{10}	$CK_{10}, CK_7, CK_5, CK_4, CK_{11}$	$CK_{13}, CK_2, CK_9, CK_{14}, CK_{17}$
P_{11}	$CK_{10}, CK_7, CK_5, CK_4, CK_{11}$	$CK_{13}, CK_9, CK_1, CK_2, CK_{14}$
P_{12}	$CK_{10}, CK_7, CK_5, CK_4, CK_{11}$	$CK_1, CK_{13}, CK_9, CK_{17}, CK_2$
P_{13}	$CK_{10}, CK_7, CK_5, CK_4, CK_{11}$	$CK_2, CK_{13}, CK_1, CK_{14}, CK_{17}$
P_{14}	$CK_{10}, CK_7, CK_5, CK_4, CK_{11}$	$CK_{13}, CK_9, CK_1, CK_{17}, CK_2$

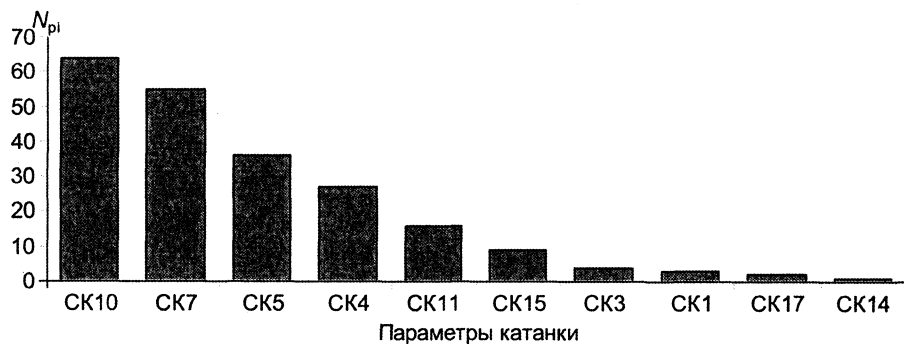


Рис. 13. Диаграмма Парето для анализа вкладов характеристик катанки в формирование ее микроструктуры

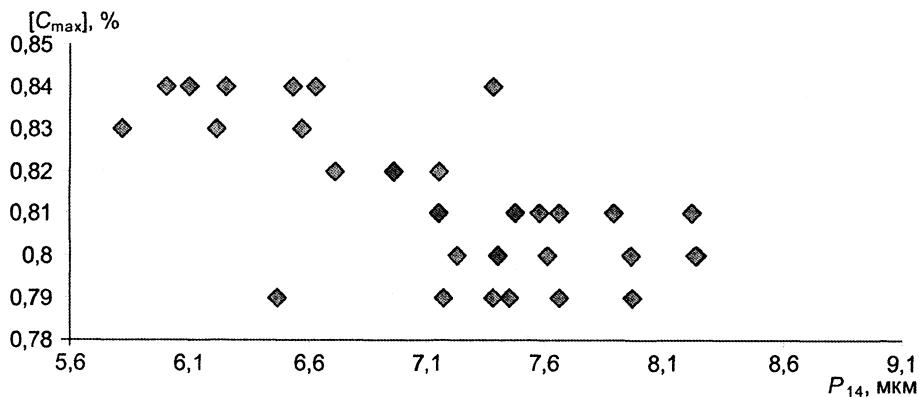


Рис. 14. Взаимосвязь максимального содержания углерода в катанке и спектральной характеристики микроструктуры катанки P_{14}

спектральными характеристиками микроструктуры P_i , где $i = 1, 14$, и свойствами катанки $CK_1 - CK_{17}$.

При анализе результатов все свойства катанки были разделены на две группы. В первую группу входили два наиболее сильно связанных свойства со спектральными характеристиками микроструктуры, во вторую группу – два свойства наименее взаимосвязанных со спектральными характеристиками (табл. 7).

По данным таблицы была построена диаграмма Парето для анализа взаимосвязей между спек-

тральными характеристиками микроструктуры катанки и свойствами катанки (рис. 13). Как видно из рисунка, свойства катанки, которые имеют наибольший вклад в формирование микроструктуры катанки, – это CK_{10} («содержание хрома»), CK_7 («содержание марганца»), CK_5 («максимальное содержание углерода»), CK_4 («минимальное содержание углерода») и CK_{11} («содержание никеля»).

Наиболее значимые взаимосвязи между параметрами микроструктур и свойствами катанки показаны на рис. 14, 15.

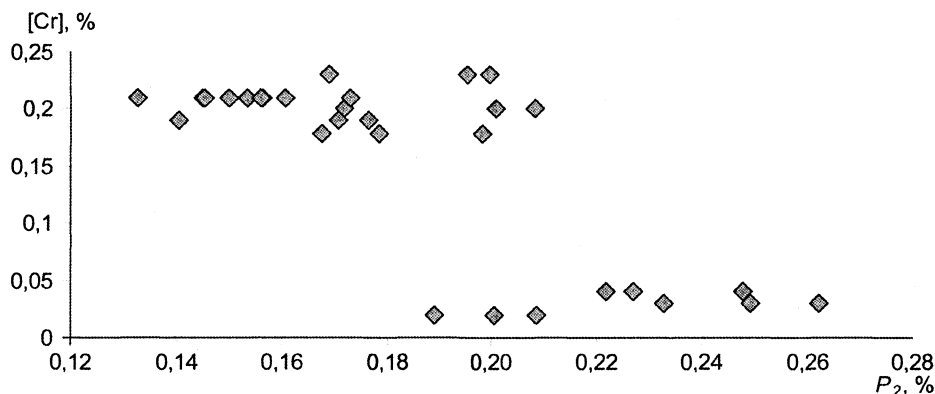


Рис. 15. Взаимосвязь содержания хрома в катанке и спектральной характеристики микроструктуры катанки P_2

На рис. 14 приведена взаимосвязь между характеристикой катанки «максимальное содержание углерода» и спектральной характеристикой микроструктуры катанки P_{14} «видимое межпластиночное расстояние, соответствующее пику функции распределения $H_p(d_{пл})$ ». Как видно из рисунка, имеется линейная тенденция к увеличению значений спектральной характеристики микроструктуры при уменьшении концентрации углерода. Например, заметно, что для группы точек со значениями концентрации углерода больше 0,81 наблюдаются более низкие значения спектральной характеристики микроструктуры P_{14} (7,2 и ниже). Рассчитанный коэффициент корреляции составляет $-0,67$.

На рис. 15 представлены взаимосвязи между характеристикой катанки «содержание хрома» и спектральной характеристикой микроструктуры P_2 «площадь окрестности пика функции распределения межпластиночных расстояний $H_p(d_{пл})$ ». Как видно из рисунка, распределение точек можно разделить на две области. Первая область характеризуется высокими значениями концентрации хрома (0,16–0,23) и низкими значениями па-

раметров микроструктуры (меньше 0,18), вторая область – низкими значениями концентрации (0,03–0,04) и большими значениями параметра микроструктуры (0,22 и выше). Коэффициент корреляции составляет $-0,75$.

Таким образом, показано, что спектральные характеристики, определенные по изображению микроструктур образцов катанки на основе функции плотности распределения межпластиночных расстояний феррита и цементита, связаны с ее механическими свойствами (предел прочности, относительное сужение). В то же время спектральные характеристики микроструктуры катанки, рассчитанные по функции плотности распределения межпластиночных расстояний, коррелируют с некоторыми свойствами стальной проволоки (разрывное усилие, относительное удлинение, степень расслоя). Это свидетельствует о том, что параметры микроструктуры перлитной стали, основанные на интегрировании функции плотности межпластиночных расстояний, могут быть использованы для прогноза как механических свойств катанки, так и свойств стальной проволоки, изготавливаемой из нее.

Литература

1. Бочвар А. А. Металловедение. М.: Металлургиздат, 1956.
2. Физическое металловедение / Я. С. Уманский, М. С. Блантер, Б. Н. Финкельштейн. М.: Металлургиздат, 1955.
3. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970.
4. Чичко А. Н., Сачек О. А., Веденеев А. В., Соболев В. Ф. О новых математических методах анализа микроструктур эвтектоидных колоний перлитных сталей // Литье и металлургия. 2008. № 4. С. 104–112.
5. Чичко А. Н., Сачек О. А., Лихоузов С. Г., Веденеев А. В. и др. / Свидетельство о регистрации компьютерной программы АОМ-1 № 085. Заявка № С20090028 зарегистрирована 16.06.2009 в Национальном центре интеллектуальной собственности.