



Interconnection between the parameters of the rolled wire production technology and characteristics of its microstructure is shown. The correlation interconnections between the characteristics of the rolled wire microstructure, calculated by method of image processing, and technology of its receipt in conditions of RUP «BMZ» are determined.

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

УДК 629.113

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ ЭВТЕКТОИДНЫХ КОЛОНИЙ ПЕРЛИТА КАТАНКИ

Известно, что микроструктура сплава в значительной степени определяет его свойства [1–3]. Развитие компьютерных технологий открывает новые возможности для исследования взаимосвязей «микроструктура катанки – технология проката» в рамках реального технологического процесса. Данная задача имеет как практическое, так и теоретическое значение для совершенствования режимов изготовления катанки.

Целью работы является исследование взаимосвязей между параметрами технологии изготовления катанки и характеристиками ее микроструктуры, определяемыми с использованием метода обработки изображений [4–6].

Исходными данными служили микроструктуры 30 экспериментов. Все данные были получены на основе образцов катанки, изготавливаемой по технологии, используемой на РУП «БМЗ». В качестве технологических параметров получения катанки были выбраны T_1 – «Время в печи», T_2 – «Скорость редуционно-калибровочного блока (РКБ)», T_3 – «Температура в печи», T_4 – «Температура перед первой клетью», T_5 – «Температура перед проволочным блоком», T_6 – «Температура перед РКБ», T_7 – «Температура виткообразователя», T_8 – «Среднее значение скорости моргана», T_9 – «Степень открытия клапанов водяного охлаждения зоны 1», T_{10} – «Степень открытия клапанов водяного охлаждения зоны 2», T_{11} – «Степень открытия клапанов водяного охлаждения зоны 3.1», T_{12} – «Степень открытия клапанов водяного охлаждения зоны 3.2», T_{13} – «Скорость стельмора (мастер)», T_{14} – «Скорость стельмора (секция 1)», T_{15} – «Скорость стельмора (секция 6)», T_{16} – «Скорость стельмора (секция 11)», T_{17} – «Скорость стельмора (сек-

ция 16)», T_{18} – «Скорость цепи», T_{19} – «Степень открытия клапанов вентиляторов стельмора (F1)», T_{20} – «Степень открытия клапанов вентиляторов стельмора (F2)».

В качестве характеристик микроструктуры катанки, использованных в расчетах, были использованы параметры, характеризующие доли видимых межпластиночных расстояний различного диапазона: S_1 – «Площадь распределения $P(d_{пл})$ », S_2 – «10% площади распределения $P(d_{пл})$ », S_3 – «20% площади распределения $P(d_{пл})$ », S_4 – «30% площади распределения $P(d_{пл})$ », S_5 – «40% площади распределения $P(d_{пл})$ », S_6 – «50% площади распределения $P(d_{пл})$ », S_7 – «60% площади распределения $P(d_{пл})$ », S_8 – «70% площади распределения $P(d_{пл})$ », S_9 – «80% площади распределения $P(d_{пл})$ », S_{10} – «90% площади распределения $P(d_{пл})$ ». Параметры $P_1 - P_{10}$ вычисляются по формуле:

$$P_i = \int_{d_{\min}}^{d_i} P(d_{\text{пл}}) dP,$$

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

С использованием баз данных РУП «БМЗ» были сформированы матрицы данных для статистического исследования взаимосвязи между параметрами микроструктур, параметрами технологических режимов, параметрами катанки и проволоки (табл. 1, 2).

С помощью программного обеспечения «Автоматизированная обработка микроструктур» АОМ-1 [7] были рассчитаны функции распределения межпластиночных расстояний $P(d_{пл})$ для всех экспериментов. На рис. 1–3 приведены функции распределения $P(d_{пл})$ для всех образцов. На основе данных

Т а б л и ц а 1. Матрица данных для исследования взаимосвязи между параметрами микроструктур катанки и параметрами технологических режимов ее получения

Номер образца	Параметры технологических режимов																			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄	T ₁₅	T ₁₆	T ₁₇	T ₁₈	T ₁₉	T ₂₀
1	104	100,99	1138	993	979	957	853	62,79	14,1	73,6	79,6	19,3	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,76	80	80
2	101	100,99	1140	983	972	948	848	62,63	14,1	73,7	80,0	19,3	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,76	80	80
3	100	100,99	1136	976	970	935	840	62,63	14,1	73,7	79,9	19,3	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,76	80	80
4	97	101,00	1136	986	987	962	855	62,69	8,4	65,0	36,9	44,5	1,09	1,13	1,21	1,28	1,28	0,76	80	80
5	127	101,00	1121	981	976	951	849	62,72	8,4	64,9	33,8	44,5	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,76	80	80
6	124	101,00	1126	990	988	957	853	62,75	8,4	64,8	37,0	44,5	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,76	80	80
7	101	100,99	1138	992	986	946	850	62,70	14,1	70,3	79,8	19,3	1,11	1,14	1,21	1,28	0,73	0,76	80	80
8	101	100,99	1139	987	982	942	848	62,73	14,1	69,9	79,5	19,3	1,11	1,14	1,21	1,28	0,73	0,76	80	80
9	110	100,99	1139	991	985	935	842	62,70	14,1	66,0	79,1	19,3	1,11	1,14	1,21	1,28	0,73	0,76	80	80
10	135	99,99	1141	997	959	956	844	62,20	37,6	32,4	37,4	9,8	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,82	80	80
11	111	99,99	1138	989	956	947	844	62,16	43,0	32,3	37,0	7,6	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,82	80	80
12	99	100,00	1144	978	949	945	847	62,20	43,4	32,5	38,2	7,9	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,82	80	80
13	102	100,00	1143	1003	986	979	850	62,10	16,5	50,5	38,9	11,4	1,11	1,14	1,21	1,28	0,73	0,76	70	70
14	101	100,00	1141	1004	984	973	849	62,10	16,5	40,0	36,6	11,4	1,11	1,14	1,21	1,28	0,73	0,76	70	70
15	101	100,00	1145	969	974	979	847	62,20	16,5	36,3	36,1	11,4	1,11	1,14	1,21	1,28	0,73	0,76	70	70
16	111	99,99	1140	1008	938	942	842	62,32	37,0	68,6	16,8	28,8	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,77	80	80
17	107	99,99	1146	1009	942	941	842	62,16	34,2	61,2	34,8	9,0	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,77	80	80
18	113	99,99	1142	988	954	945	826	62,20	34,2	59,8	34,1	12,3	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,77	80	80
19	97	104,99	1153	1028	990	967	853	66,05	14,9	68,2	102,1	39,1	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,79	80	80
20	96	104,99	1153	1021	986	965	851	65,20	14,9	68,2	102,0	39,0	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,79	80	80
21	96	104,99	1153	1021	986	965	851	65,20	14,9	68,2	102,0	39,0	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,79	80	80
22	138	105,00	1140	1015	986	971	847	65,17	14,9	51,1	102,1	42,3	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,79	80	80
23	138	104,99	1158	1024	994	977	849	65,10	14,9	51,1	102,0	42,3	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,79	80	80
24	103	104,99	1148	1021	990	978	850	65,20	14,9	51,1	101,8	42,3	0,20	0,73	0,91	0,96	0,96	0,11	80	80
25	90	104,99	1153	1004	964	999	851	65,23	16,8	51,4	88,6	30,1	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,90	80	80
26	90	104,99	1139	989	955	956	852	65,27	16,8	51,5	88,7	30,2	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,90	80	80
27	87	104,99	1147	994	962	959	853	65,27	16,8	51,5	88,6	30,2	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,90	80	80
28	102	104,99	1137	1003	976	966	852	65,22	10,7	40,7	81,4	33,4	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,76	75	75
29	102	104,99	1141	991	961	951	847	65,22	10,8	41,2	81,6	36,7	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,76	75	75
30	94	104,99	1145	1010	976	962	852	65,18	10,8	37,8	81,4	36,7	1,11	1,14	1,21	1,28	1,28	0,76	75	75

Т а б л и ц а 2. Матрица расчетных характеристик микроструктур катанки

Номер образца	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀
1	0,13	0,13	8,70	1,05	3,08	4,49	5,53	6,31	6,94	7,50
2	0,14	0,13	8,33	1,11	3,14	4,48	5,42	6,16	6,75	7,24
3	0,15	0,14	8,11	1,17	3,26	4,55	5,41	6,05	6,59	7,05
4	0,15	0,14	7,98	1,16	3,29	4,57	5,42	6,04	6,56	7,00
5	0,16	0,15	7,81	1,27	3,25	4,38	5,17	5,79	6,32	6,77
6	0,18	0,17	6,83	1,39	3,48	4,58	5,23	5,65	5,97	6,24
7	0,15	0,15	7,52	1,19	3,35	4,69	5,57	6,17	6,6	6,90
8	0,16	0,16	7,47	1,28	3,39	4,56	5,31	5,88	6,3	6,65
9	0,17	0,16	7,06	1,32	3,5	4,60	5,29	5,77	6,15	6,46
10	0,17	0,17	6,84	1,34	3,53	4,68	5,38	5,83	6,14	6,38
11	0,18	0,17	6,35	1,42	3,59	4,68	5,30	5,69	5,94	6,11
12	0,20	0,19	5,89	1,54	3,69	4,64	5,14	5,43	5,62	5,75
13	0,15	0,14	8,14	1,19	3,21	4,46	5,32	5,96	6,50	6,96

Номер образца	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
14	0,18	0,16	7,12	1,38	3,35	4,41	5,08	5,57	5,99	6,33
15	0,17	0,16	6,76	1,35	3,43	4,65	5,38	5,86	6,16	6,37
16	0,19	0,18	6,27	1,47	3,59	4,64	5,21	5,57	5,80	5,97
17	0,19	0,18	6,41	1,44	3,61	4,64	5,25	5,65	5,93	6,13
18	0,19	0,19	6,13	1,49	3,69	4,69	5,22	5,52	5,73	5,88
19	0,14	0,12	8,69	1,04	3,16	4,56	5,56	6,34	6,98	7,52
20	0,13	0,12	8,90	0,94	3,17	4,72	5,78	6,6	7,26	7,81
21	0,15	0,13	8,23	1,18	3,08	4,33	5,23	5,93	6,50	7,02
22	0,12	0,12	8,94	0,98	3,01	4,48	5,56	6,42	7,10	7,72
23	0,14	0,13	8,29	1,12	3,14	4,47	5,39	6,12	6,72	7,17
24	0,14	0,13	8,44	1,12	3,15	4,44	5,35	6,07	6,67	7,19
25	0,15	0,14	7,62	1,18	3,39	4,63	5,44	6,04	6,51	6,87
26	0,12	0,12	8,4	1,01	3,13	4,66	5,76	6,54	7,11	7,55
27	0,14	0,13	8,31	1,08	3,27	4,63	5,54	6,2	6,73	7,20
28	0,14	0,13	7,63	1,10	3,35	4,87	5,84	6,47	6,90	7,20
29	0,13	0,12	9,24	0,99	3,05	4,50	5,55	6,35	7,03	7,65
30	0,15	0,15	7,77	1,21	3,31	4,54	5,37	5,99	6,48	6,88

функции распределения межпластиночных расстояний $P(d_{пл})$ были определены параметры микроструктур $P_1 - P_{10}$.

На рис. 4 показана схема исследований взаимосвязей между характеристиками микрострук-

туры катанки и параметрами технологии ее получения.

На рис. 5–14 показаны результаты исследований расчетов коэффициента информативности (коэффициента корреляции) между параметром ми-

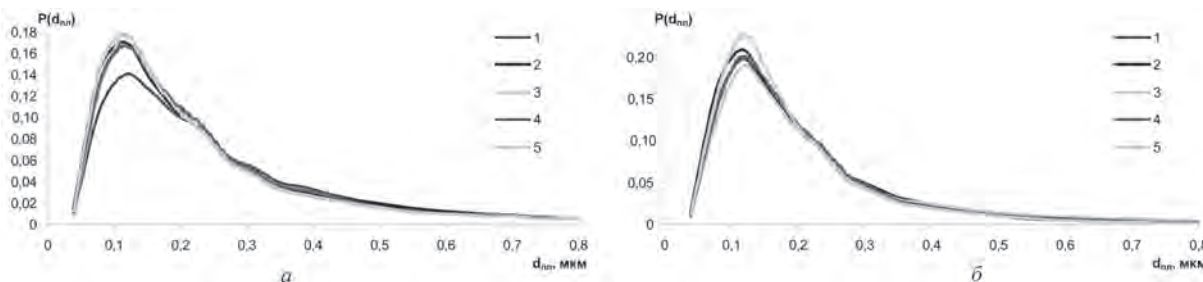


Рис. 1. Функции распределения $P(d_{пл})$ для образцов № 1–10 микроструктуры катанки: а – 1 – образец № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5; б – 1 – образец № 6; 2 – № 7; 3 – № 8; 4 – № 9; 5 – № 10

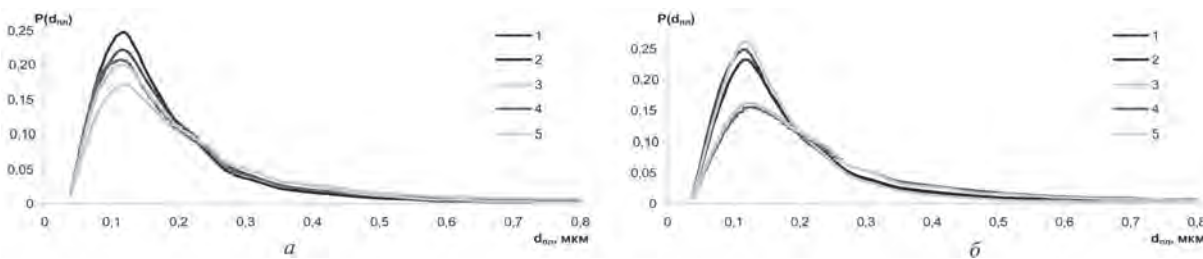


Рис. 2. Функции распределения $P(d_{пл})$ для образцов № 11–20 микроструктуры катанки: а – 1 – образец № 11; 2 – № 12; 3 – № 13; 4 – № 14; 5 – № 15; б – 1 – образец № 16; 2 – № 17; 3 – № 18; 4 – № 19; 5 – № 20

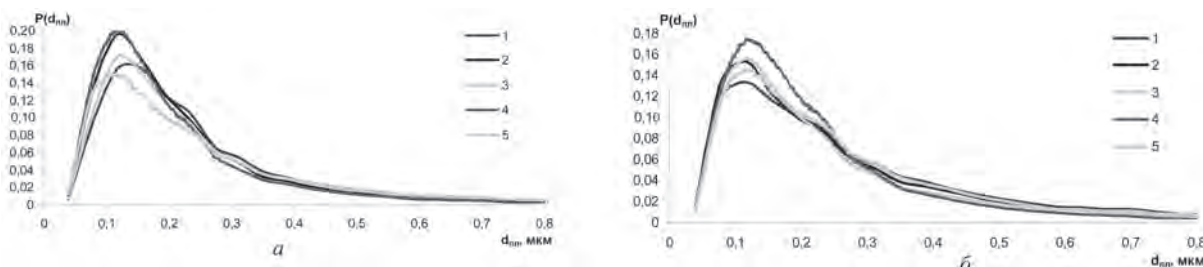


Рис. 3. Функции распределения $P(d_{пл})$ для образцов № 21–30 микроструктуры катанки: а – 1 – образец № 21; 2 – № 22; 3 – № 23; 4 – № 24; 5 – № 25; б – 1 – образец № 26; 2 – № 27; 3 – № 28; 4 – № 29; 5 – № 30

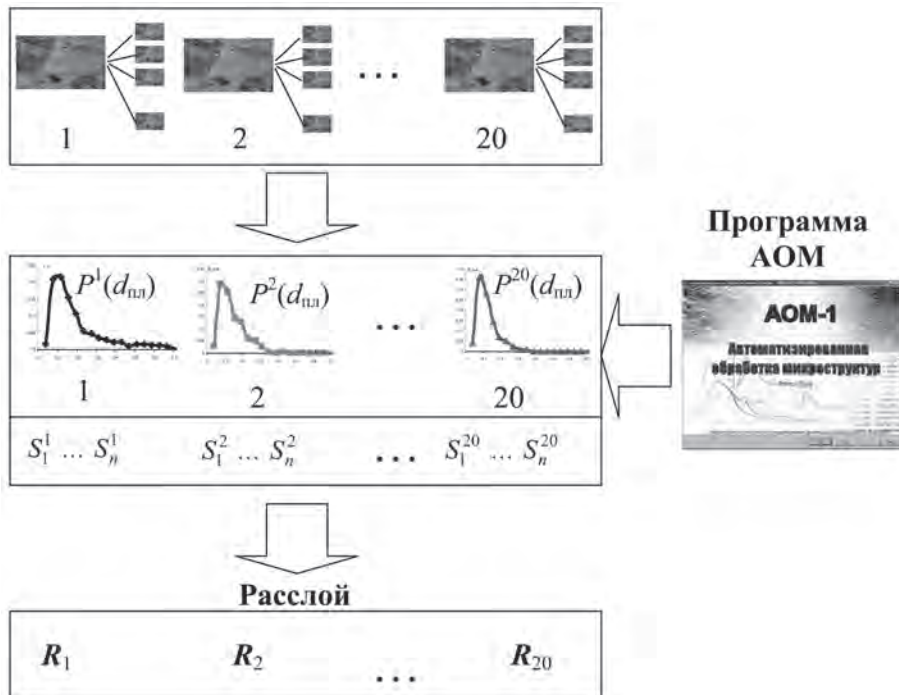


Рис. 4. Схема исследований взаимосвязей между характеристиками микроструктуры катанки и параметрами технологии ее получения

коструктуры S_i , где $i = 1, 10$, и параметрами технологии $T_1 - T_{20}$ в виде графических диаграмм с указанием количественной степени взаимосвязи относительно самой значимой взаимосвязи в пределах диаграммы.

При анализе полученных результатов все технологические параметры были разделены на три группы. В первую группу входили пять факторов,

наиболее сильно связанных с параметром микроструктуры, во вторую группу – пять наименее взаимосвязанных с микроструктурами и третья группа являлась промежуточной и отражала среднюю степень взаимосвязи между параметрами микроструктуры и параметрами технологии. Параметры технологии первой и второй групп для всех параметров микроструктуры приведены в табл. 3.

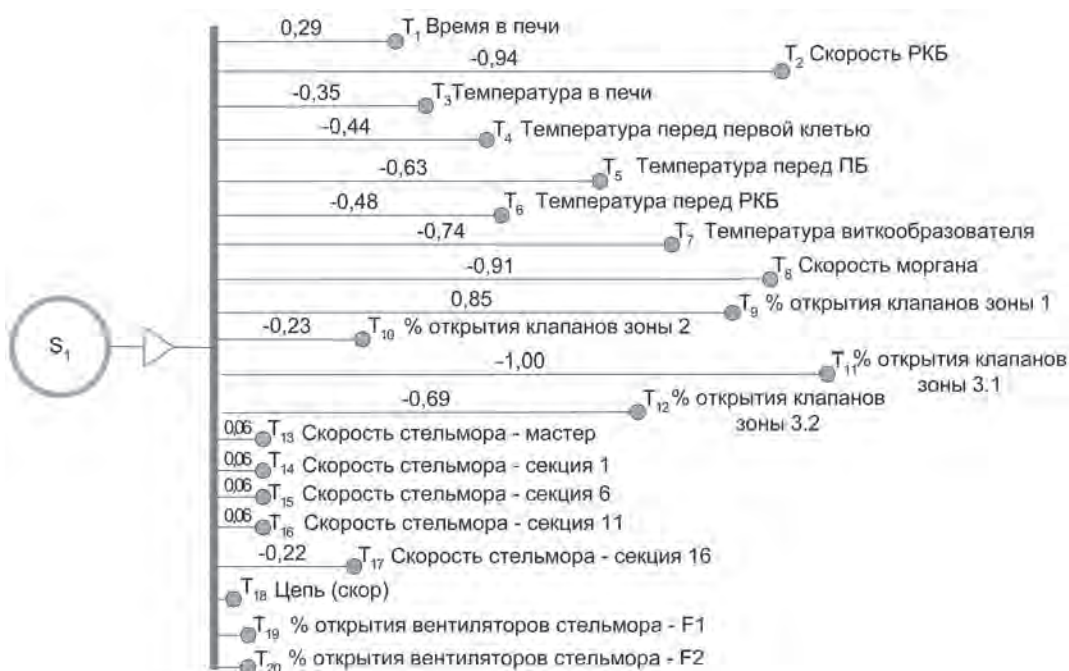


Рис. 5. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_1 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$

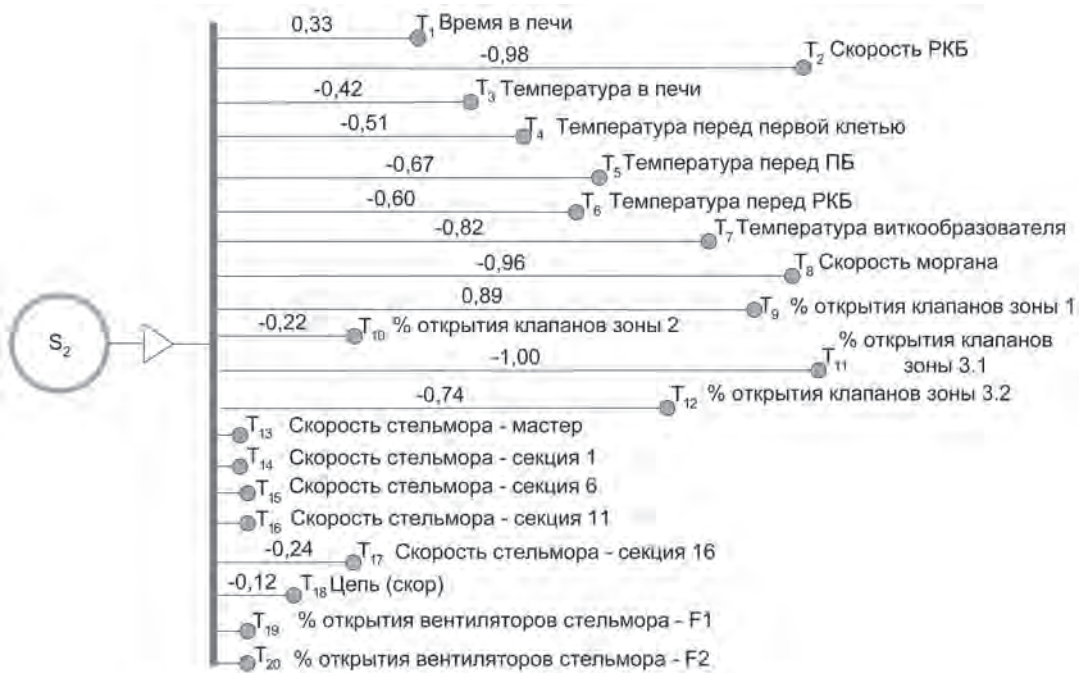


Рис. 6. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_2 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$

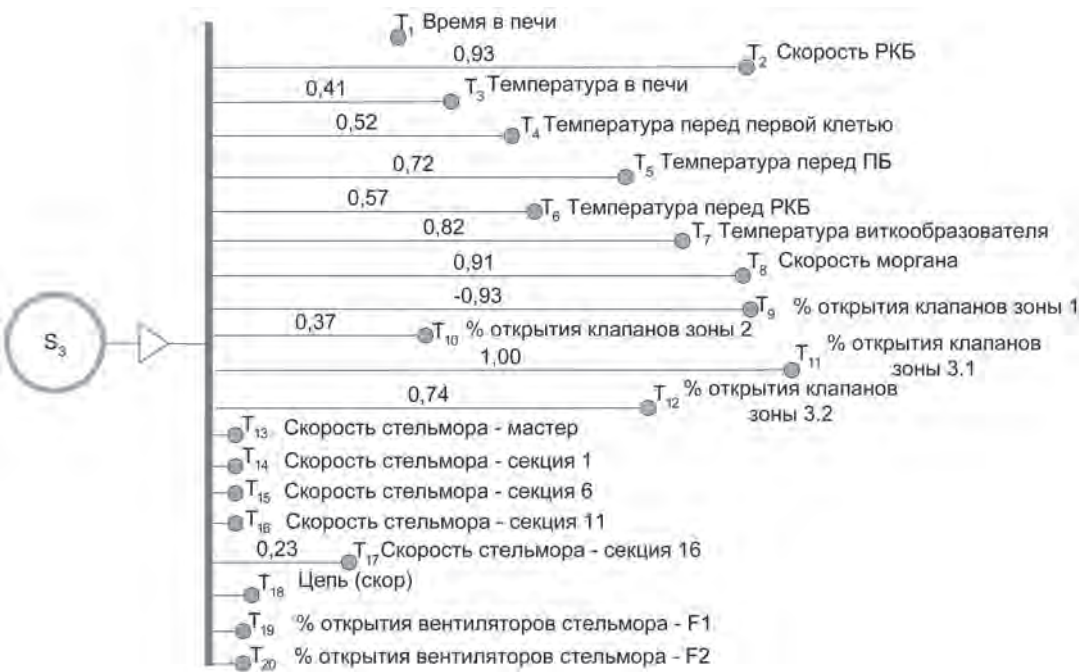


Рис. 7. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_3 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$

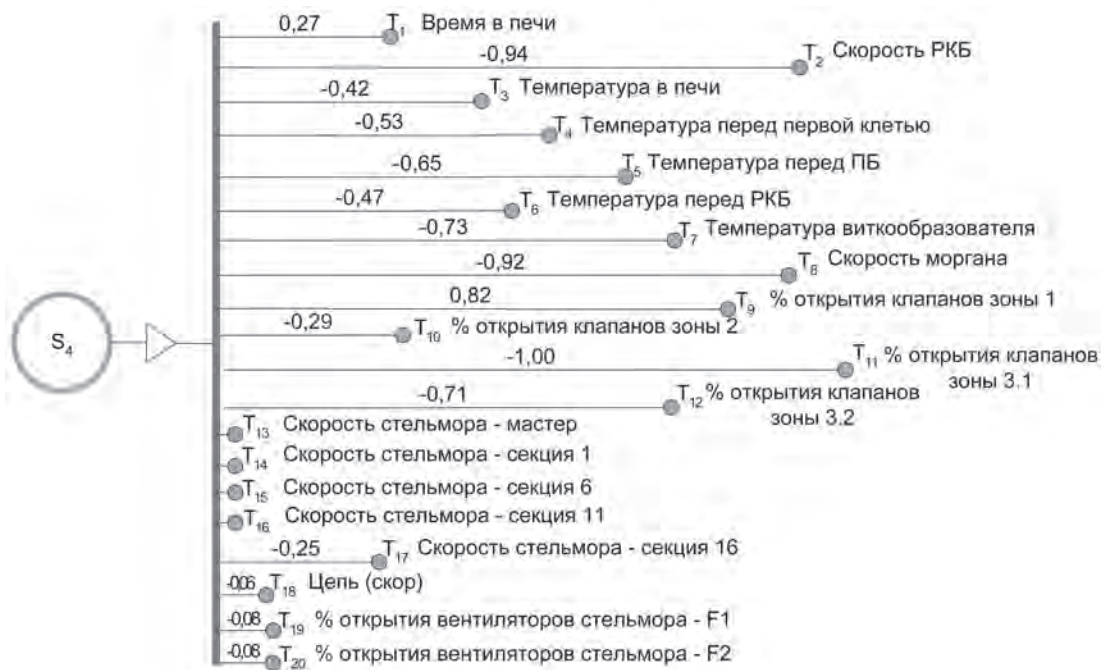


Рис. 8. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_4 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$

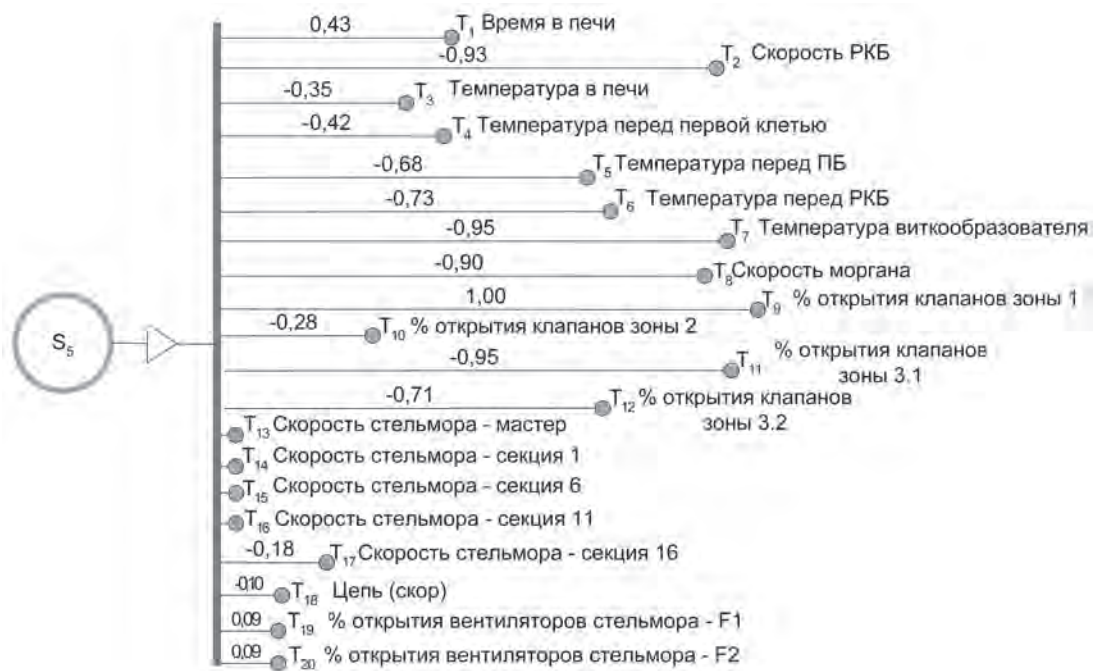


Рис. 9. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_5 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$



Рис. 10. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_6 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$

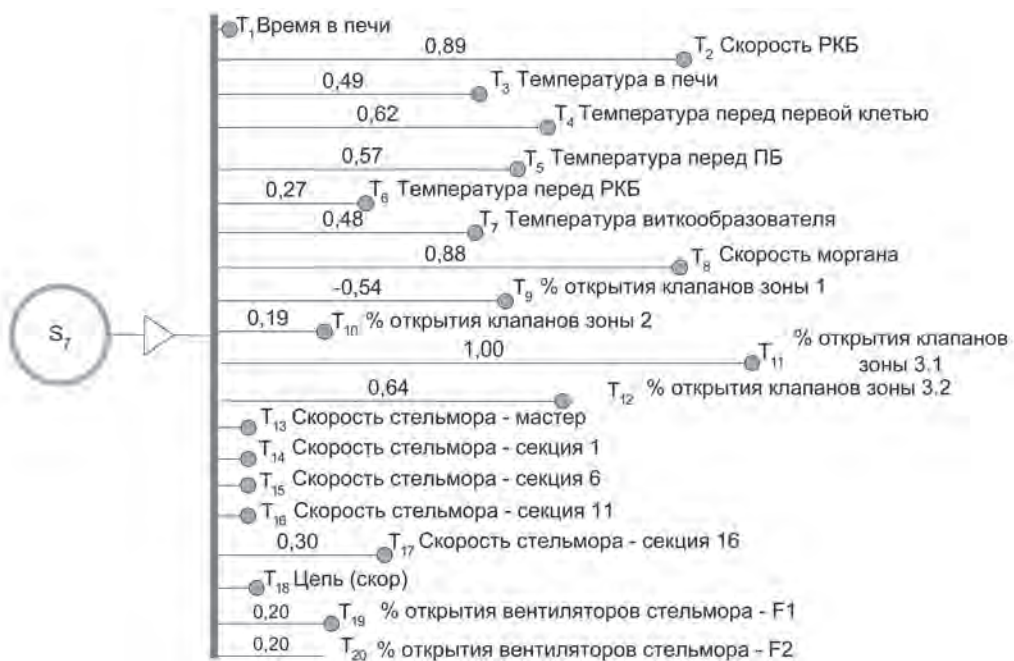


Рис. 11. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_7 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$

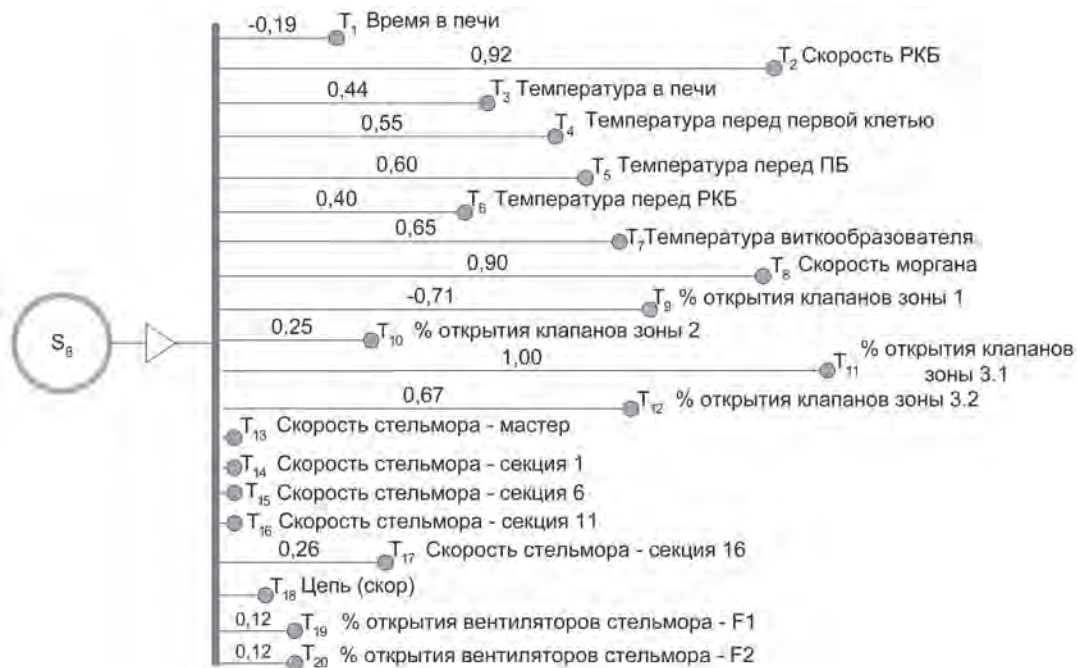


Рис. 12. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_8 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$

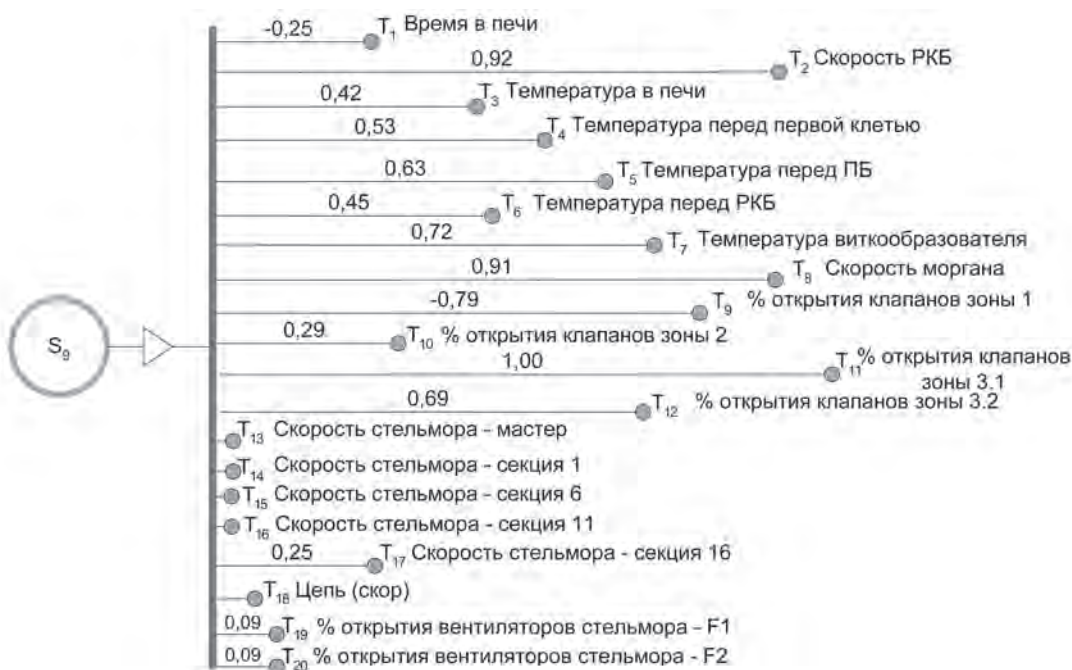


Рис. 13. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_9 и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$



Рис. 14. Диаграмма взаимосвязей между параметром микроструктуры S_{10} и параметрами технологических режимов катанки $T_1 - T_{20}$

Т а б л и ц а 3. Группы влияния параметров технологических режимов на параметры микроструктуры

Параметр микроструктуры катанки	Первая группа параметров технологических режимов	Вторая группа параметров технологических режимов
S_1	$T_9, T_7, T_2, T_8, T_{11}$	$T_{19}, T_{20}, T_{13}, T_{14}, T_{15}$
S_2	$T_2, T_8, T_{11}, T_7, T_{12}$	$T_5, T_{18}, T_4, T_3, T_{13}$
S_3	$T_{11}, T_2, T_8, T_9, T_7$	$T_{18}, T_{19}, T_{20}, T_{13}, T_{14}$
S_4	$T_{11}, T_2, T_8, T_9, T_7$	$T_{13}, T_{14}, T_{19}, T_{20}, T_{15}$
S_5	$T_{11}, T_2, T_9, T_8, T_7$	$T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{19}$
S_6	$T_{11}, T_2, T_8, T_9, T_7$	$T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{18}$
S_7	$T_9, T_{11}, T_7, T_2, T_6$	$T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{19}$
S_8	$T_{11}, T_2, T_8, T_{12}, T_4$	$T_1, T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{18}$
S_9	$T_{11}, T_2, T_8, T_9, T_7$	$T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{18}$
S_{10}	$T_{11}, T_2, T_8, T_9, T_7$	$T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{18}$

По данным таблицы была составлена диаграмма Парето для анализа вклада параметров технологии получения катанки в ее микроструктуру (рис. 15). Как видно из рисунка, параметры технологии, которые имеют наибольший вклад в формирование микроструктуры катанки, это T_{11} («Степень открытия клапанов водяного охлаждения зоны 3.1»), T_2 («Скорость редуционно-калибровочного блока»), T_8 («Скорость моргана»), T_9 («Степень открытия клапанов водяного охлаждения зоны 1») и T_7 («Температура виткообразователя»).

Таким образом, на основе метода обработки изображений микроструктуры стальной катанки

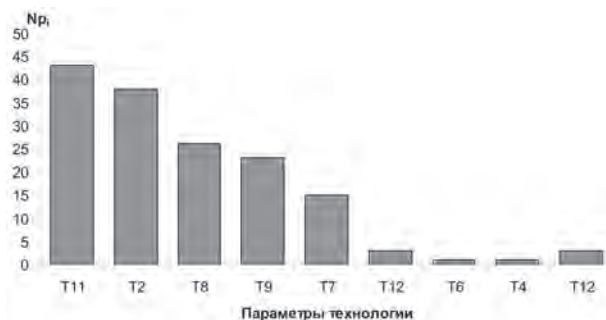


Рис. 15. Диаграмма Парето для анализа вклада параметров технологии получения катанки в ее микроструктуру

показана взаимосвязь между параметрами технологии изготовления катанки и характеристиками ее микроструктуры. Установлены корреляционные взаимосвязи между параметрами микроструктуры катанки и технологией ее получения в условиях РУП «БМЗ». Наибольший вклад в формирование микроструктуры катанки, используемой в процессе прокатки и волочения из нее бортовой бронированной проволоки, вносят следующие параметры технологических режимов получения катанки: «Степень открытия клапанов водяного охлаждения зоны 3.1», «Скорость редуционно-калибровочного блока», «Скорость моргана», «Степень открытия клапанов водяного охлаждения зоны 1» и «Температура виткообразователя».

Литература

1. Бочвар А. А. Металловедение. М.: Metallurgizdat, 1956.
2. Уманский Я. С., Блантер М. С., Финкельштейн Б. Н. Физическое металловедение. М.: Metallurgizdat, 1955.
3. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Metallurgiya, 1970.
4. Чичко А. Н., Сачек О. А., Веденеев А. В., Соболев В. Ф. Системный анализ взаимосвязей между спектральными характеристиками изображения микроструктуры стали и ее механическими свойствами в металлургической продукции // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 61–70.
5. 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.
6. 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.
7. АОМ-1 / А. Н. Чичко, О. А. Сачек, С. Г. Лихоузов, А. В. Веденеев, Е. П. Барадынцева, В. Ф. Соболев: № С20090028, заявл. 11.06.2009, зарег. 16.06.2009.