

The interrelation between microstructure characteristics, defined on the basis of its computer image and properties of industrial facilities, produced at RUP «BMZ» is investigated.

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

УДК 004.932+669

О ПУТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ТИПА «МИКРОСТРУКТУРА – СВОЙСТВА»

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

Для исследования взаимосвязей между структурой и свойствами проволоки и катанки были отобраны 60 образцов микроструктур катанки для десяти различных плавки. Образцы представляли собой фотографии поперечного сечения катанки диаметром 5,5 мм из сталей 80 БВ, 80К, из которых в последующем изготавливают бортовую проволоку в условиях производства РУП «БМЗ». Фотографии были сделаны на электронном микроскопе Vega II LMV-Tescan при увеличении 4000. Фотографическая съемка сечения катанки производилась по центру сечения с определенным шагом. Каждому образцу соответствует свой отличный от других набор технологических параметров и соответственно свои механические свойства, химический состав и др. Для каждой плавки были взяты фотографии для трех бунтов: 10-, 30- и 60-го. Для каждого бунта было отобрано не менее чем по 20 фотографий микроструктур. Таким образом, всего в расчетах использовалось не менее чем $20 \cdot 3 \cdot 10 = 600$ фотографий микроструктур. Образцы № 1–6 соответствуют плавке № 304804, образцы № 7–12 – плавке № 304805, образцы № 13–18 – плавке № 304817, образцы № 19–24 – плавке № 300004, образцы № 25–30 – плавке № 300242, образцы № 31–36 – плавке № 300360, образцы № 37–42 – плавке № 305641, образцы № 43–48 – плавке № 305643, образцы № 49–54 – плавке № 305646, образцы № 55–60 – плавке

№ 306065. Изображения некоторых микроструктур приведены на рис. 1–3. Для каждого образца на рисунках приведены фотографии крайних и центральных участков поперечного сечения катанки.

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 металлом технологической цепочки охлаждаются с различной скоростью. Как известно, в зависимости от скорости охлаждения эвтектоидное превращение аустенит→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 разных 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 даже для одного образца различаются между собой. Это свидетельствует о статистическом характере распределения характеристик микроструктуры, подчиняющимся недетерминированным законам охлаждения заготовки. Следует отметить и то, что 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 микроструктуры. Зерна в данной микроструктуре выявляются недостаточно

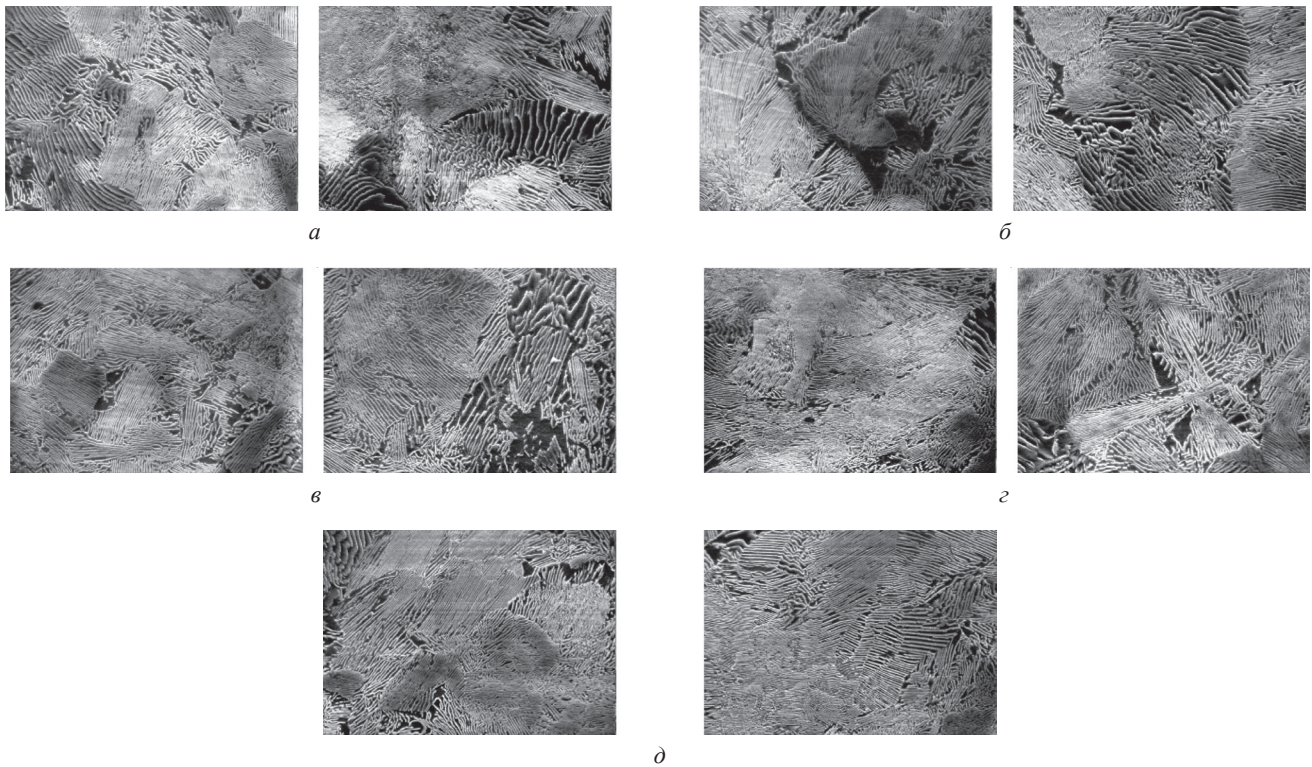


Рис. 1. Изображения микроструктур перлитной стали образцов № 1–5: а – образец № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4; д – № 5

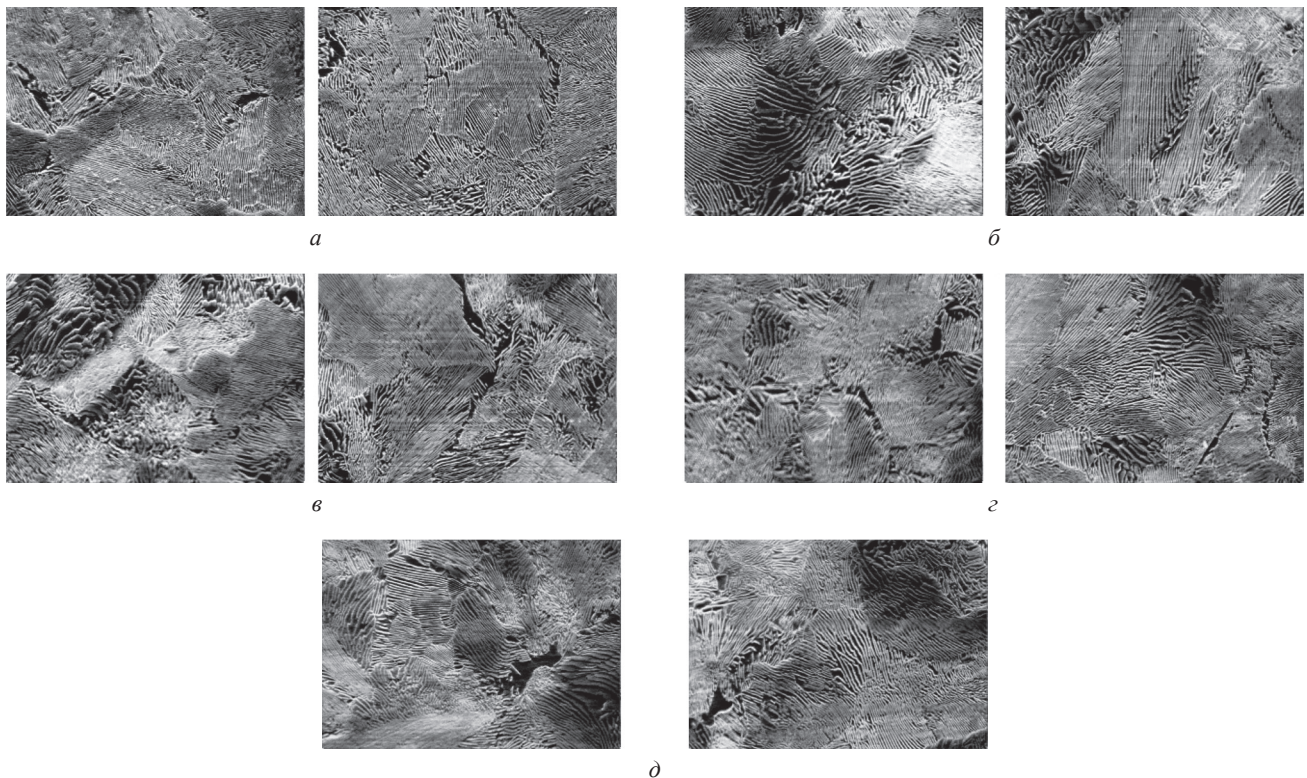


Рис. 2. Изображения микроструктур перлитной стали образцов № 36–40: а – образец № 36; б – № 37; в – № 38; г – № 39; д – № 40

четко, что не позволяет такую характеристику как «площадь зерна» использовать в качестве характеристики микроструктуры.

В этом случае для обработки микроструктур можно предложить математическое описание микроструктуры в виде распределения межпласти-

ночных расстояний. Пусть $H_P(d_{пл})$ – функция, характеризующая распределение межпластиночных расстояний на видимой плоскости микрошлифа. Тогда изображение микроструктуры может быть заменено этой функцией распределения, т. е. речь идет о построении математической модели кон-

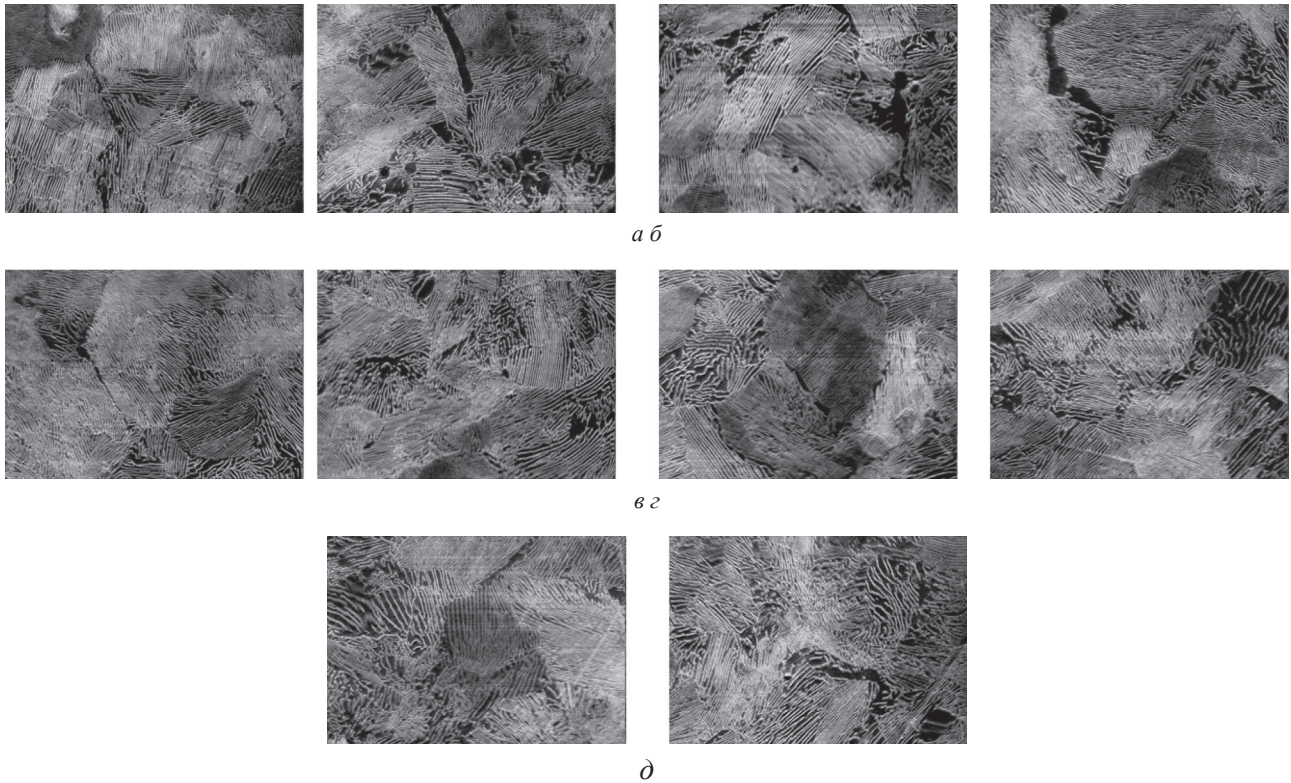


Рис. 3. Изображения микроструктур перлитной стали образцов № 36–40: а – образец № 56; б – № 57; в – № 58; г – № 59; д – № 60

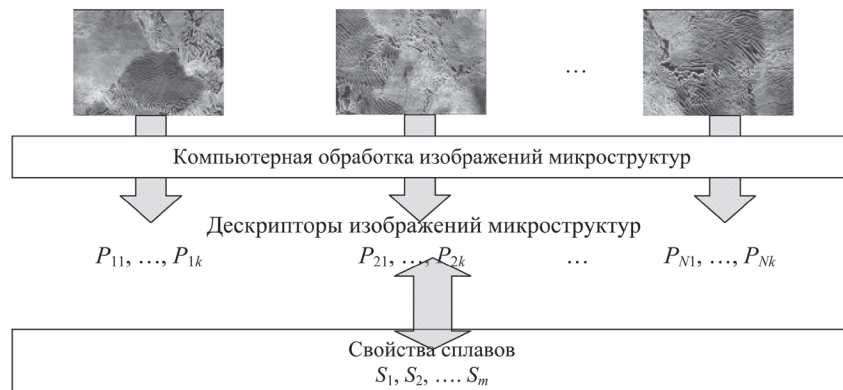


Рис. 4. Этапы формализации микроструктуры и замены ее математической моделью

кретной микроструктуры и замене реальной микроструктуры образца стали функцией, описывающей распределение межпластиночных расстояний.

На рис. 4 приведены этапы формализации микроструктуры, заключающиеся в замене ее множеством чисел, отражающим особенности межпластиночных расстояний эвтектоидной колонии. На последующих этапах эти модели будут использоваться для установления взаимосвязей характеристик микроструктуры со свойствами стали.

С помощью программы автоматизированной обработки микроструктур перлитной стали «АОМ-1» [1] были рассчитаны функции распределения межпластиночных расстояний $H_P(d_{пл})$ (рис. 5–7) и характеристики для всех образцов микроструктур катанки, приведенные в таблице.

В работе были использованы следующие характеристики, вычисленные по формулам:

$$P_1 = \begin{cases} d_{пл}^k - \Delta ds_1, & \text{если } H_P(d_{пл}^{k-1}) > H_P(d_{пл}^{k+1}), \\ d_{пл}^k + \Delta ds_2, & \text{если } H_P(d_{пл}^{k-1}) \leq H_P(d_{пл}^{k+1}), \end{cases}$$

где $k = \arg \max(H_P(d_{пл}))$;

$$s_1 = \frac{H_P(d_{пл}^{k-1}) - H_P(d_{пл}^{k+1})}{2(H_P(d_{пл}^k) - H_P(d_{пл}^{k+1}))};$$

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

$$P_2 = \sum_{k=1}^q H_P(d_{пл}^k) d_{пл}^k;$$

Значения характеристик функции распределения межпластиночных расстояний в перлите катанки для различных образцов

Характеристика	Номер образца														
	1	2	3	4	5	36	37	38	39	40	56	57	58	59	60
P_1 , мкм	0,136	0,145	0,136	0,136	0,138	0,136	0,152	0,165	0,144	0,149	0,147	0,150	0,160	0,155	0,161
P_2 , мкм	0,25	0,248	0,245	0,249	0,234	0,195	0,243	0,263	0,239	0,253	0,243	0,240	0,243	0,255	0,260
P_3 , мкм	0,41	0,484	0,432	0,401	0,475	0,553	0,469	0,434	0,483	0,462	0,492	0,497	0,477	0,437	0,419
P_4 , о. е.	0,443	0,443	0,442	0,437	0,445	0,446	0,452	0,455	0,449	0,448	0,455	0,458	0,458	0,453	0,452
P_5 , о. е.	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
P_6 , о. е.	0,077	0,073	0,086	0,078	0,083	0,104	0,072	0,062	0,080	0,073	0,078	0,077	0,071	0,075	0,077
P_7 , о. е.	0,246	0,235	0,261	0,242	0,281	0,340	0,222	0,191	0,243	0,224	0,241	0,239	0,217	0,215	0,209
P_8 , о. е.	0,413	0,411	0,436	0,404	0,478	0,557	0,395	0,352	0,420	0,392	0,422	0,423	0,394	0,373	0,359
P_9 , о. е.	0,548	0,556	0,573	0,535	0,621	0,705	0,541	0,496	0,563	0,535	0,570	0,574	0,547	0,512	0,495
P_{10} , о. е.	0,661	0,674	0,682	0,646	0,729	0,809	0,660	0,621	0,680	0,655	0,687	0,694	0,673	0,631	0,614
P_{11} , о. е.	0,795	0,807	0,806	0,787	0,843	0,912	0,804	0,772	0,817	0,798	0,818	0,825	0,816	0,775	0,766
P_{12} , о. е.	0,915	0,919	0,914	0,919	0,932	0,976	0,929	0,912	0,933	0,917	0,923	0,931	0,930	0,913	0,909
P_{13} , о. е.	0,961	0,96	0,959	0,968	0,964	0,992	0,973	0,959	0,971	0,960	0,963	0,968	0,969	0,965	0,964
P_{14} , о. е.	0,993	0,993	0,994	0,996	0,993	0,999	0,998	0,993	0,995	0,991	0,994	0,993	0,996	0,996	0,996

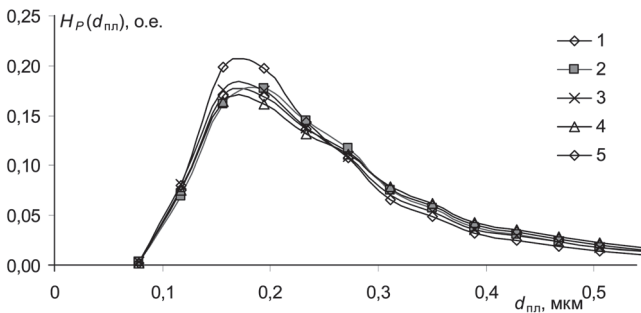


Рис. 5. Функции распределения межпластиночных расстояний в перлите катанки $H_P(d_{пл})$ для образцов № 1–5 (см. рис. 1): 1 – образец № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5

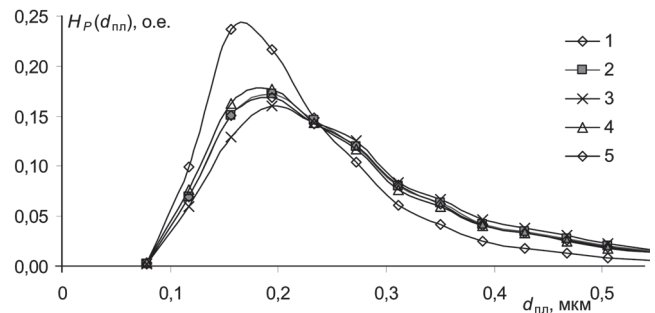


Рис. 6. Функции распределения межпластиночных расстояний в перлите катанки $H_P(d_{пл})$ для образцов № 36–40 (см. рис. 2): 1 – образец № 36; 2 – № 37; 3 – № 38; 4 – № 39; 5 – № 40

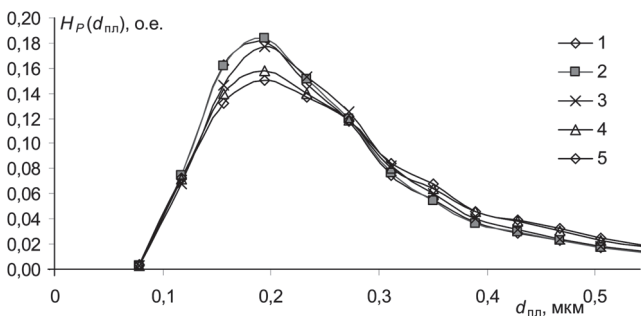


Рис. 7. Функции распределения межпластиночных расстояний в перлите катанки $H_P(d_{пл})$ для образцов № 56–60 (см. рис. 3): 1 – образец № 56; 2 – № 57; 3 – № 58; 4 – № 59; 5 – № 60

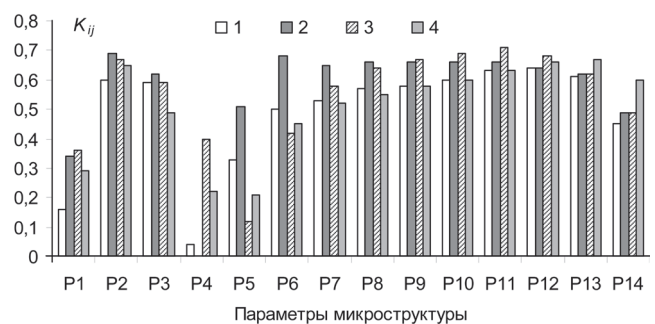


Рис. 8. Гистограммы значений коэффициентов парных корреляций между параметрами микроструктуры и характеристиками химического состава: 1 – $[C]_{\min}$; 2 – $[C]_{\max}$; 3 – $[Cr]$; 4 – $[Ni]$

$$P_3 = \sum_{i=k-1}^{k+1} H_P(d_{пл}^i) d_{пл}^i ;$$

$$P_4 = \frac{\sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} N_{ij}^3}{L_x L_y} ;$$

$$P_i = \sum_{i=1}^{t_i} H_P(d_{пл}^i) d_{пл}^i ;$$

характеристика P_1 (мкм), характеризующая преобладающее межпластиночное расстояние микроструктуры; характеристика P_2 (мкм), характеризующая среднее межпластиночное расстояние микроструктуры; характеристика P_3 (мкм), характеризующая приведенное межпластиночное расстояние, соответствующее максимальному значению функции распределения $H_P(d_{пл})$; характеристика P_4 (о. е.), характеризующая долю цементитных пластин ми-

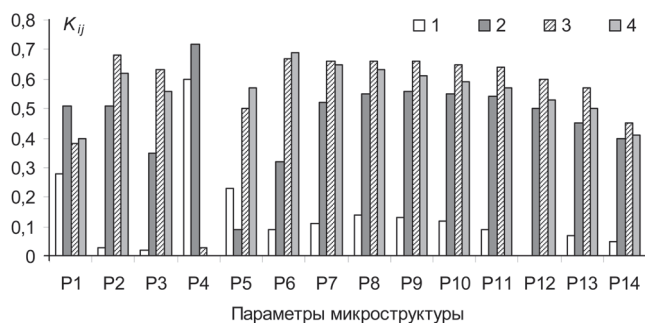


Рис. 9. Гистограммы значений коэффициентов парных корреляций между параметрами микроструктуры и свойствами проволоки: 1 – разрывное усилие; 2 – относительное удлинение; 3 – число скручиваний проволоки; 4 – степень расщепления

кросструктуры; группа характеристик P_5-P_{14} (о. е.), характеризующих доли межпластиночных расстояний микроструктуры в различных диапазонах от d_{\min} до d_i , где $d_i = 0,04t_i$; $i = 5, 14$; $t_i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 16, 26$.

На основе составленных исходных данных была получена матрица корреляций, по которой были построены гистограммы. На рис. 8, 9 приведены данные для коэффициентов информативности, которые вычислялись как $K_{ij} = R_{ij}$. Как видно из рисунков, почти для всех характеристик микроструктуры имеются абсолютные значения коэффициентов корреляции больше 0,5, что говорит о существовании влияния микроструктуры на свойства катанки. Для проверки адекватности полученных взаимосвязей между характеристиками микроструктуры и свойствами образцов были определены критерии Фишера. Вычисленные значения критериев (от 0,64 до 0,76) меньше критического значения (1,4) и, следовательно, указанные взаимосвязи можно считать адекватными.

Установленные корреляции свидетельствуют о возможности построения многомерных регрессионных зависимостей, связывающих свойства металлургической продукции и характеристики микроструктуры катанки, причем в качестве характеристик микроструктур могут быть использованы разнообразные комбинации вышеописанных дескрипторов, а также их модификации, позволяющие повышать описательную способность регрессионных моделей. Например, одна из полученных зависимостей для предела прочности катанки (коэффициент множественной корреляции 0,81) имеет вид

$$\sigma = -368,70 + 1798,43P_3 + 1178,70P_6 + 2833,03P_8 - 1524,44P_9 - 1053,44P_{13} + 1784,68P_{14}.$$

С использованием разработанного программного обеспечения была решена задача классификации образцов стальной проволоки с различной

степенью расслоения на основе статистической функции распределения межпластиночных расстояний. В качестве характеристики стальной проволоки использовали показатель, используемый на РУП «БМЗ» в качестве характеристики степени расслоения проволоки. На основе промышленных данных были выбраны две группы образцов и микроструктур, которые в дальнейшем будем называть как группы А и Б. Степень расщепления образцов первой группы А составляла не более 7% (число образцов группы равно 42), степень расщепления для образцов группы Б – более 7% (число образцов группы равно 18). Так, на рис. 10 приведены одиночные (для каждого образца) и усредненные функции распределения $H_P(d_{nn})$ двух групп А и Б. Как видно из рисунка, функции распределения для образцов первой группы с меньшей степенью расщепления имеют более ярко выраженный пик функции распределения по сравнению с аналогичными кривыми, описывающими образцы второй группы, т. е. проволока с меньшей степенью расщепления характеризуется большим значением преобладающего расстояния и соответственно имеет более однородную структуру по сравнению с проволокой из группы с большей степенью расщепления.

Аналогичные исследования были проведены для величины содержания углерода в проволоке. Группу А составляли образцы со значениями содержания углерода не более 0,80 % (число образцов равно 24), группу Б – образцы со значениями

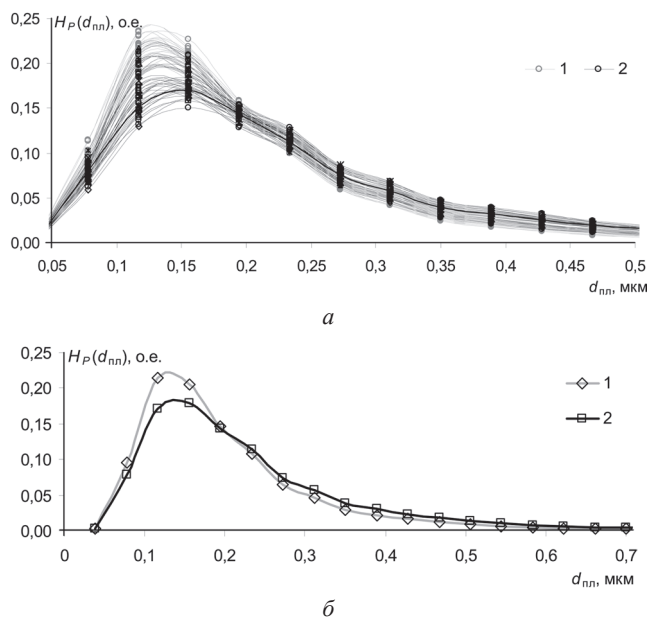


Рис. 10. Одиночные (60 шт.) и усредненные статистические функции распределения межпластиночных расстояний, рассчитанные по изображениям микроструктур образцов двух групп катанки, с разными значениями степени расщепления проволоки: 1 – образцы группы А; 2 – образцы группы Б; а – одиночные функции распределения; б – усредненные функции распределения

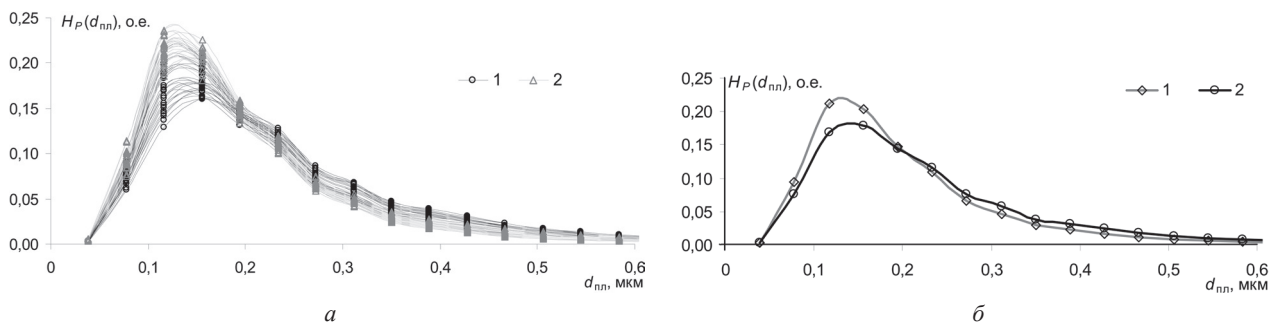


Рис. 11. Одиночные (48 шт.) и усредненные статистические функции распределения межпластиночных расстояний, рассчитанные по изображениям микроструктур образцов двух групп катанки, с разными значениями содержания углерода в катанке: 1 – образцы группы А; 2 – образцы группы Б; а – одиночные функции распределения; б – усредненные функции распределения

более 0,81 % (число образцов равно 24). На рис. 11 показаны функции распределения $H_p(d_{пл})$ двух групп образцов А и Б. Как видно из рисунка, кривые для образцов первой группы с меньшим содержанием углерода имеют в большинстве своем более ярко выраженный пик функции распределения по сравнению с образцами второй группы, т. е. проволока с большим содержанием углерода характеризуется большим значением преобладающе-

го расстояния и соответственно имеет более однородную структуру по сравнению с проволокой из группы с меньшим содержанием углерода.

Таким образом, применение дескрипторов изображения микроструктур перлитной стали открывает новые возможности для исследования взаимосвязей между свойствами сплавов (свойствами промышленной продукции) и параметрами микроструктуры.

Литература

1. Свидетельство о регистрации компьютерной программы АОМ-1: 085 / А. Н. Чичко, О. А. Сачек, С. Г. Лихоузов, А. В. Веденеев, Е. П. Барадынцева, В. Ф. Соболев В. Ф. № С20090028; заявл. 11.06.2009; зарег. 16.06.2009.
2. Ч и ч к о А. Н., С а ч е к О. А., Л и х о у з о в С. Г. Методы автоматизации обработки изображений микроструктур перлитных сталей // Информационные технологии. 2010. № 7. С. 71–77.