



*Algorithms for classification of the steels microstructures, allowing to carry out computer processing of pictures with the purpose of quantitative assessment of the structure characteristics, are offered. It is shown, that using of criteria, which are calculated by spatial position and sizes of pixel spots of different brightness as characteristics of microstructure picture, allows to classify microstructures by level of steel graininess.*

А. Н. ЧИЧКО, О. А. САЧЕК, С. Г. ЛИЗОУЗОВ, БНТУ

УДК 669.27:519

## О НОВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУР СТАЛЕЙ

Одной из важнейших технических задач теории металлов является исследование взаимосвязей между свойствами материала и характеристиками микроструктуры. Известно, что микроструктура сплава, полученного в реальных условиях кристаллизации, является разнородной, причем размеры зерен могут изменяться относительно друг друга от нескольких до десятков раз. Изучать взаимосвязи между характеристиками неравновесной структуры и свойствами сплава очень сложно, так как отдельные участки микроструктуры могут быть нетипичными для структуры сплава в целом. Традиционные методики анализа структуры основываются на принципе усреднения различных параметров структуры. Известно, что размер зерна в значительной степени влияет на механические свойства сплавов. В то же время при определении среднего размера зерна усредняются как равноосные зерна, так и столбчатые, вытянутые в одном из направлений. В этом случае поиск корреляций между характеристиками микроструктуры и свойствами сплава довольно сложная задача. По-видимому, это является одной из причин невысокого уровня корреляционной связи между свойствами и характеристиками микроструктуры материалов. К сожалению, традиционные металлографические подходы, как правило, основаны именно на таких подходах.

Развитие компьютерных методов обработки изображений открывает новые возможности для анализа микроструктур сплавов. Появление компьютеров открыло новые пути для совершенствования идеологической основы обработки микроструктур. При этом количество и характеристики микроструктуры предполагается не уменьшать, сглаживая путем усреднения, а увеличивать. Например, касаясь размера зерна, можно отметить, что микроструктура сплава должна характеризоваться не усредненным зерном, что нивелирует особенности всех зерен, а функцией распределения зерен по их размерам. Сущность этой функции сводится

к определению частотной характеристики зеренной структуры по размеру зерен. Фактически она показывает число зерен от его размера для исследуемой микроструктуры. Именно такой подход может дать новый толчок к поиску взаимосвязей между характеристиками микроструктуры и свойствами сплавов.

Целью настоящей статьи является разработка новых компьютерных методов для определения характеристик микроструктуры на примере стали 12ХНЗА.

Известно, что в зависимости от условий охлаждения в металлографической лаборатории структуры классифицируют по восьмибальной шкале. На рис. 1 приведены микроструктуры исследуемых сплавов. Как видно из рисунка, они являются эталонными, в одних частях микроструктуры присутствует большее количество аустенита, в других меньше. Условно разрезав микроструктуру на четыре части, можно видеть определенный разброс в характеристиках изображения. Практика работы со специалистами металлографических лабораторий показывает, что разные специалисты могут проводить несколько отличную классификацию микроструктур, что свидетельствует о значительном субъективном факторе в оценке микроструктур.

Для обработки микроструктур использовали следующую методику. На первом этапе (рис. 1–3) проводили бинаризацию; заключающуюся в присвоении различным участкам микроструктуры значений 0 и 1 в зависимости от задаваемого порога яркости. Причем в данном исследовании порог яркости являлся величиной переменной, изменяющейся от 0,2 до 0,9. Изменение порога яркости проводили с целью получения статистической картины распределения микроструктурных составляющих. На рис. 2, 3 приведены микроструктуры, классифицируемые по степени бальности с соответствующими порогами яркости. На рис. 4 показан интерфейс работы программы по первич-

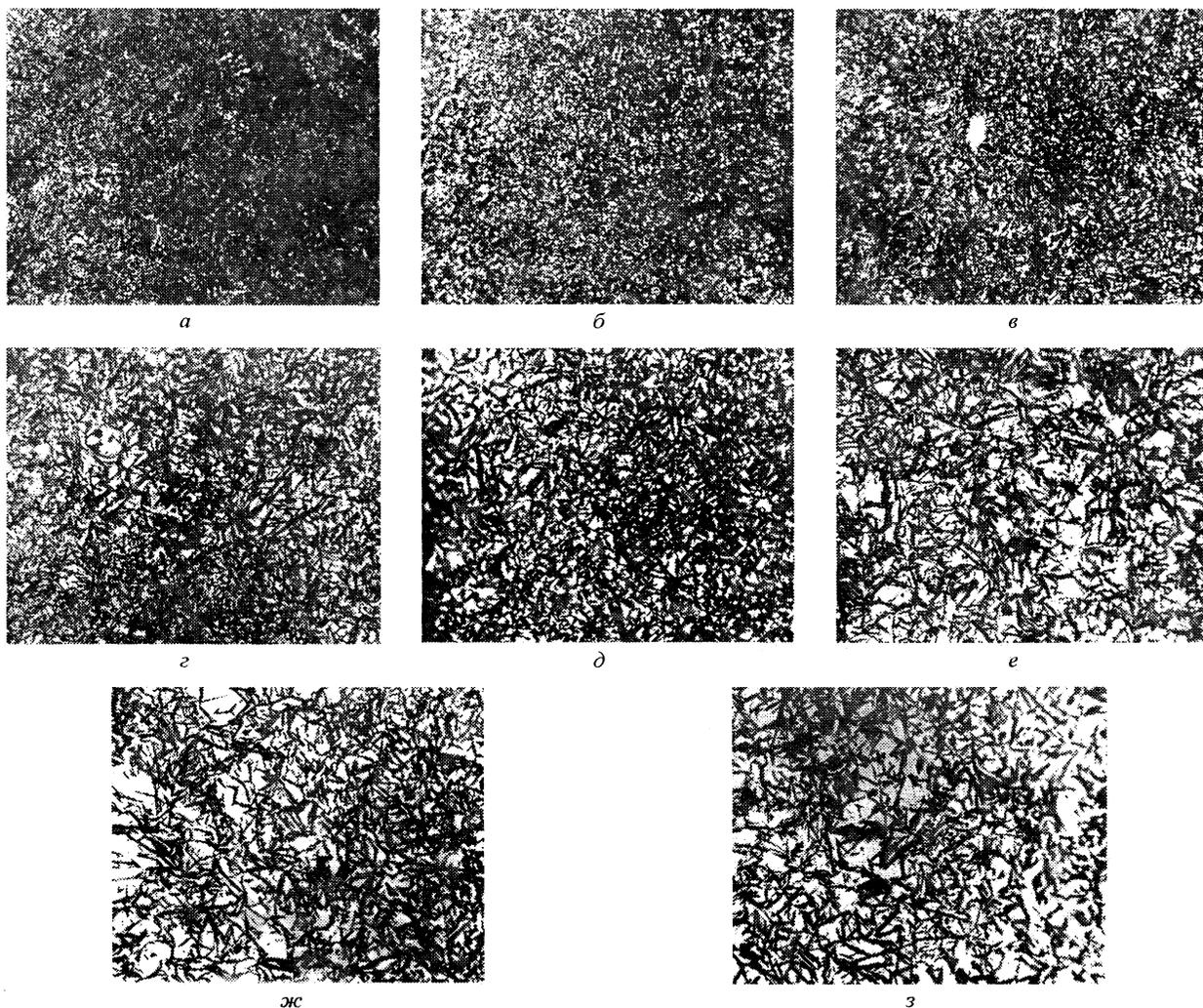


Рис. 1. Эталонные шкалы микроструктур цементованного слоя для стали 20ХН3А различной бальности: а – 1-й балл; б – 2-й; в – 3-й; г – 4-й; д – 5-й; е – 6-й; ж – 7-й; з – 8-й балл. x400

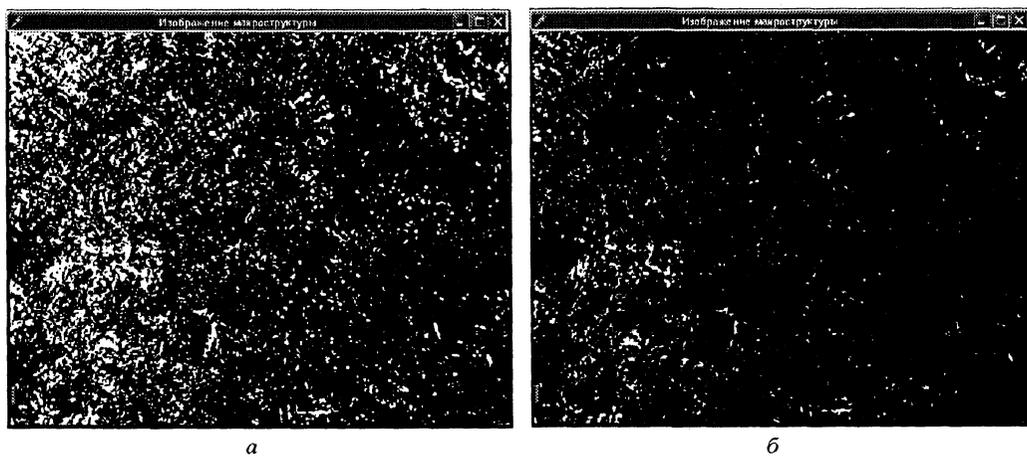


Рис. 2. Эталонные шкалы микроструктур цементованного слоя 1-го балла с различным порогом яркости: а – порог яркости 0,6; б – порог яркости 0,9. x400

ной обработке микроструктур аустенитно-мартенситного класса. При обработке изображений микроструктур в металловедческой лаборатории специалисты обращают внимание на два фактора: количество мартенсита (темные области) и величину остаточного аустенита (светлые области).

В настоящей работе развивается метод, позволяющий формализовать сложнейшую задачу ме-

талловедения, связанную с анализом и классификацией микроструктур сталей. Причем речь идет о переходе от качественного анализа микроструктуры к количественному, другими словами, речь идет о разработке математического аппарата, позволяющего обрабатывать микроструктуру сплавов на основе анализа размеров областей, состоящих из пикселей, через введение параметров

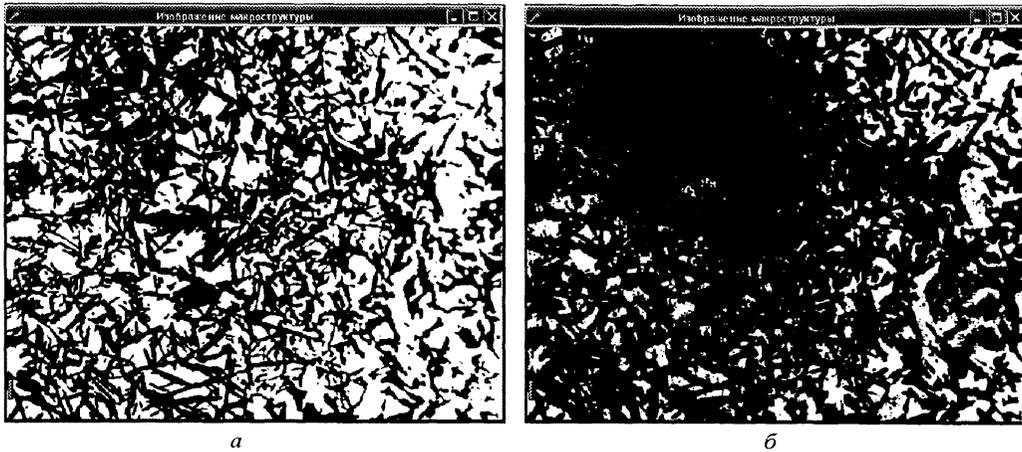


Рис. 3. Эталонные шкалы микроструктур цементованного слоя 8-го балла с различным порогом яркости: а – порог яркости 0,6; б – порог яркости 0,9. x400

изображения (критериев). Для краткости и удобства изложения материала назовем пиксель, значение яркости которого не менее заданного значения,  $\alpha$ -пикселем (светлый пиксель) и  $\beta$ -пикселем, если его яркость меньше этого значения (темный пиксель). Исследование микроструктур можно условно разбить на три этапа.

На первом этапе вводится критерий  $K_1$ , характеризующий число  $\alpha$ - и  $\beta$ -пикселей на микроструктурах, при варьировании порога яркости:

$$K_1(r) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^\beta}{\sum_{j=1}^m P_j}, \quad (1)$$

где  $P_i^\beta$  –  $\beta$ -пиксель микроструктуры для порога яркости  $r$ ,  $P_j$  – пиксель микроструктуры;  $n$  – число  $\beta$ -пикселей для порога яркости  $r$ ,  $m$  – число всех пикселей микроструктуры.

Величина критерия  $K_1$  определяет процентное отношение темных пикселей микроструктуры относительно общего числа пикселей как функция порога яркости  $r$ . При обработке микроструктур были исследованы зависимости критерия  $K_1$  от порога яркости (диапазон изменения порога – от 0,2 до 0,9) для каждого балла микроструктур (рис. 5). Из рисунка видно, что не существует такого значения порога, для которого шкала от первого до восьмого балла выстраивалась бы в виде последовательности, с помощью которой можно было бы однозначно проводить классифика-

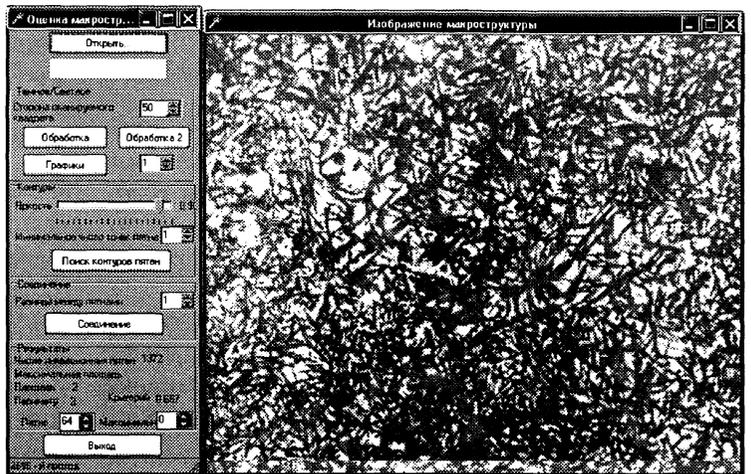


Рис. 4. Интерфейс программы для обработки изображения микроструктур

цию микроструктуры. Следовательно, этот критерий не позволяет классифицировать микроструктуры по баллам.

На втором этапе был введен критерий  $K_2$ , характеризующий размер светлых пятен микроструктуры. Формула для вычисления критерия имеет вид

$$K_2 = \sum_{i=1}^{10} S_i, \quad (2)$$

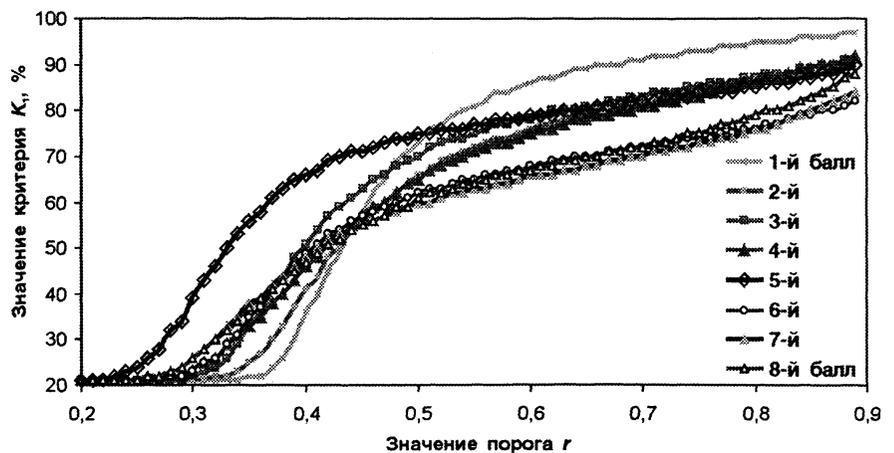


Рис. 5. Зависимость критерия  $K_1$  от значения порога яркости для каждого балла микроструктур

где  $S_i$  – размер пятна  $i$ -го порядка;  $S_i \in \Omega$  ( $\Omega$  – множество пятен, отсортированных в порядке убывания), т.е.  $S_1$  – пятно максимального размера.

Фактически по формуле (2) определяется сумма размеров 10 наибольших светлых пятен изображения для порога яркости  $r=0,9$ . Под пятном понимается множество точек  $M$  в микроструктуре, состоящее из  $\alpha$ -пикселей, которые удовлетворяют следующему условию: для любого  $\alpha$ -пикселя, принадлежащего множеству  $M$ , все соседние  $\alpha$ -пиксели также принадлежат множеству  $M$ . Размером пятна назовем количество составляющих его пикселей.

Алгоритм, используемый для определения пятен и их размеров, основан на по пиксельном сканировании изображения микроструктуры с целью поиска  $\alpha$ -пикселей. Общий алгоритм поиска пятен состоит из следующих операций (рис. 6).

1. Поиск первого  $\alpha$ -пикселя –  $P_1$ , присвоение ему первого номера пятна.

2. Сканирование изображения с целью распознавания следующего  $\alpha$ -пикселя, причем он должен удовлетворять условиям: это должен быть  $\alpha$ -пиксель, он не должен быть распознан, но должны быть уже распознаны верхний и правый от него  $\alpha$ -пиксели.

3. Присвоение распознанному на предыдущей операции  $\alpha$ -пикселю номера пятна путем анализа номеров пятен соседних распознанных пикселей.

4. Повторение 2-й и 3-й операций до тех пор, пока все  $\alpha$ -пиксели не будут распознаны.

5. Анализ пятен для соединения. Для этого сначала производится предварительный попарный анализ пятен с формированием матрицы  $C_{ij}$ , где  $i, j=1, n$  ( $n$  – число пятен изображения). Матрица формируется по следующему принципу: первое пятно – это множество  $A$ , состоящее из элементов  $A_r$ , где  $A_i^x, A_i^y$  – координаты пикселя на изображении и второе пятно – это множество  $B$ ,

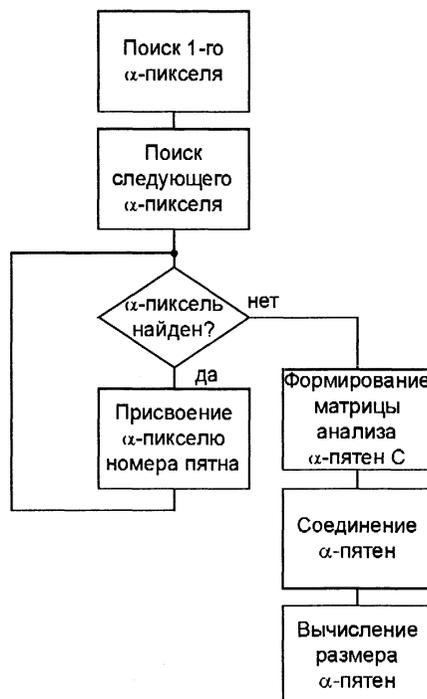


Рис. 6. Схема алгоритма поиска на изображении микроструктур  $\alpha$ -пятен

состоящее из элементов  $B_j$ , аналогично  $B_j^x, B_j^y$ , тогда  $A \cup B = M$ . Если существуют такие  $A_i$  и  $B_j$ , что  $|A_i^x - B_j^x| < p$  или  $|A_i^y - B_j^y| < p$ , где  $p$  – задаваемая разница в пикселях между пятнами, то элемент матрицы  $C_{ij}=1$ , иначе  $C_{ij}=0$ , где  $i, j$  – номера соответственно первого и второго анализируемого пятна. На следующем этапе происходит непосредственное соединение с помощью анализа значений матрицы  $C_{ij}$ . Эта операция заключается в том, что из каждого пятна и его соседей формируется одно пятно, потом производится вычисление размера каждого пятна.

Результаты применения этого алгоритма к эталонным микроструктурам стали 12ХНЗА приведены в таблице.

**Значения размеров 10 максимальных  $\alpha$ -пятен и величина критерия  $K_2$  изображений микроструктур для различных баллов**

Порядок $\alpha$ -пятна – $i$	Размеры $\alpha$ -пятен – ( $S_i$ , о.е.)							
	балл							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	285	506	1248	929	1513	2267	3055	4497
2	269	471	337	584	783	1483	2685	4165
3	186	390	312	433	453	1192	1794	3251
4	141	384	296	428	444	1079	1656	3068
5	130	358	234	409	398	1056	1384	3055
6	99	324	204	399	388	1046	1197	1931
7	93	312	190	270	328	981	905	1207
8	88	281	181	269	312	926	885	1116
9	87	246	180	244	310	907	843	1074
10	80	220	165	243	300	874	831	1031
Сумма 10 пятен (критерий $K_2$ )	1458	3492	3347	4208	5229	11811	15235	24395

Как видно из таблицы, для 2-го балла значения критерия  $K_2$  больше, чем для 3-го балла и в целом для 2-го балла характерны пятна с большим размером, чем для 3-го балла. Таким образом,

критерий  $K_2$  не может однозначно идентифицировать (ранжировать) бальность микроструктуры. На рис. 7 показаны обработанные изображения для микроструктур 2-го и 3-го баллов, которые

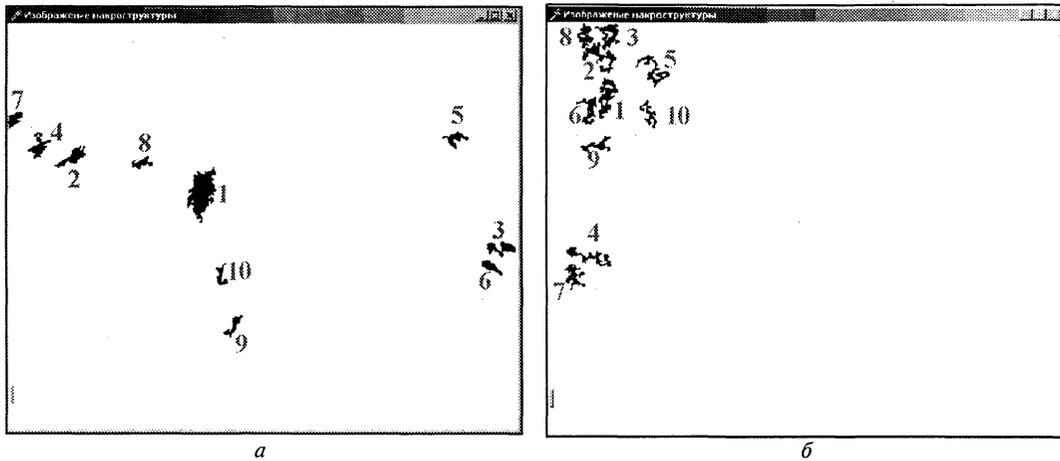


Рис. 7. Для анализа параметра  $K_2$  для шкал микроструктур 2-го и 3-го баллов

содержат 10 максимальных пятен с номерами в порядке убывания. Анализируя эти изображения, можно заметить, что пятна для микроструктуры 2-го балла имеют более вытянутую форму (игольчатую), а пятна 3-го балла более выпуклые, поэтому было решено ввести для оценки изображений критерий периметра пятна.

На третьем этапе были введены критерии  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$ , характеризующие размер и выпуклость светлых пятен. Для этого было введено понятие периметра пятна. Пусть  $P$  – периметр пятна, который представлен множеством  $M$ . Тогда величина  $P$  равна числу пикселей, для которых выполняются условия: они принадлежат множеству  $M$  и хотя бы один сосед у них  $\beta$ -пиксель. Введем критерий выпуклости пятна. Параметр  $W_i$  характеризует выпуклость  $i$ -го пятна и рассчитывается по формуле отношения размера пятна к периметру:

$$W_i = \frac{S_i}{P_i},$$

где  $i$  – номер пятна.

Критерии  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  рассчитываются по формулам:

$$K_1 = \sum_{i=1}^{10} S_i W_i = \sum_{i=1}^{10} \frac{S_i S_i}{P_i}, \quad (3)$$

$$K_2 = \sum_{i=2}^{10} S_i W_i^2 = \sum_{i=2}^{10} \frac{S_i^3}{P_i^2}, \quad (4)$$

$$K_3 = \sum_{i=2}^{10} S_i W_i^3 = \sum_{i=2}^{10} \frac{S_i^4}{P_i^3}, \quad (5)$$

где  $S_i$  – размер  $i$ -го пятна;  $W_i$  – критерий выпуклости  $i$ -го пятна;  $P_i$  – периметр  $i$ -го пятна.

Критерий  $K_3$  определяет сумму характеристик 10 наибольших светлых пятен (размер пятен), скорректированных критерием выпуклости, критерий  $K_4$  – сумму характеристик 9 наибольших (без максимального) светлых пятен, скорректированных квадратом критерия выпуклости пятен, критерий  $K_5$  – сумму характеристик 9 наибольших (без максимального) светлых пятен, скорректированных кубом критерия выпуклости пятен.

График значений  $K_3$  приведен на рис. 8. Как видно из рисунка, эта характеристика однозначно ранжирует микроструктуры по бальности. Критерии  $K_4$ ,  $K_5$  с выбросами аномальных значений были введены для получения более надежных и

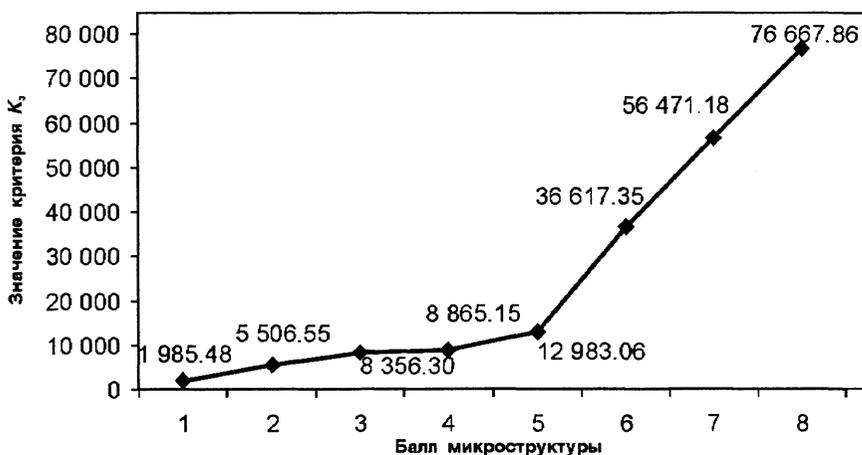


Рис. 8. Зависимость между величиной критерия  $K_3$  и баллом микроструктуры

устойчивых результатов с тем, чтобы в дальнейшем можно было построить доверительные интервалы для баллов микроструктур (рис. 9). Как видно из рис. 8, 9, увеличение значений критериев  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  приводит к увеличению бальности при оценке шкал микроструктур, а характеристика  $K_5$  наиболее хорошо (с наибольшей разницей между значениями) разделяет микроструктуры по баллам.

В результате применения критериев  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  количественные оценки изображений исходят

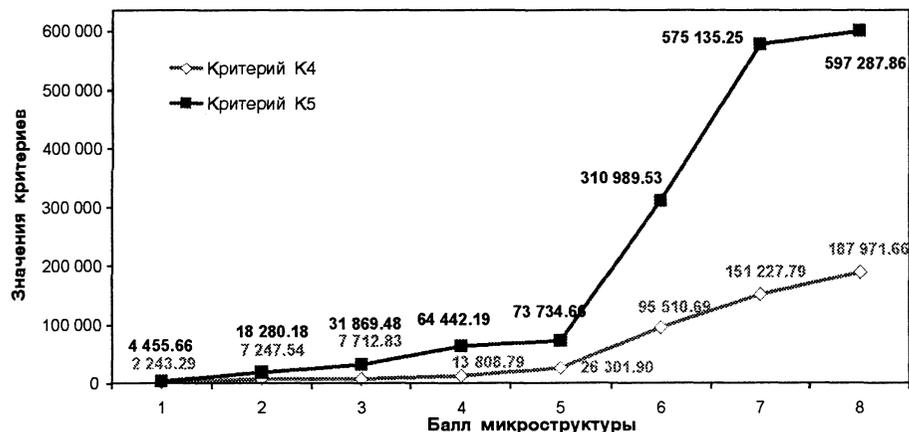


Рис. 9. Зависимость между величиной критерия  $K_4$ ,  $K_5$  и баллом микроструктуры

ных микроструктур возрастают от 1-го к 8-му баллам и классифицируются достаточно хорошо. Этот алгоритм учитывает размер и выпуклость пятен и наиболее точно отражает экспертную оценку микроструктуры по бальности. Развитием этого метода может стать анализ большого количества изображений микроструктур с учетом доверительных интервалов для каждого балла.

Таким образом, на основе выделенных характеристик компьютерного изображения микроструктуры можно проводить классификацию микроструктур на количественном уровне, т.е. перейти от качественного анализа микрострукту-

ры, который проводится человеком и в значительной степени является субъективным методом, к количественной оценке микроструктуры, заключающейся в обработке микроструктуры на компьютере. Это открывает возможности для количественного регрессионного анализа взаимосвязей между количественными характеристиками микроструктуры и свойствами сплавов. Следует отметить, что поиск взаимосвязей микроструктуры со свойствами материала может увенчаться успехом с большей вероятностью, чем поиск аналогичных зависимостей при использовании характеристик среднестатистического зерна или производных этой характеристики. Эти исследования могут быть использованы для систем автоматизированной обработки микроструктур для повышения качества изделий, изготавливаемых на предприятиях литейного и металлургического профиля. Компьютерные методы обработки могут явиться мощным инструментом для развития исследовательских работ в области металловедения чугунов и сталей.