



*Algorithms for mathematical description of microstructures of pearlitic steels is offered. It is shown that mathematical models of microstructures, built using frequency distribution of the eutectoid pearlitic steel colonies, allow to evaluate the degree of microstructure heterogeneity by inter-plate distances.*

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

УДК 669.27:519

## О НОВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУР ЭВТЕКТОИДНЫХ КОЛОНИЙ ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

Известно, что микроструктуры перлитных сталей, полученных в неравновесных условиях, состоят из эвтектоидных колоний, образовавшихся после распада аустенита и неоднородно распределенных в плоскости шлифа. При этом в различных участках микроструктуры размеры межпластинчатого 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. Простое усреднение параметров микроструктуры сглаживает особенности строения эвтектоидных колоний и исследование взаимосвязей между свойствами стали и его пара-

метрами микроструктуры еще более усложняется. В то же время современные компьютерные методы обработки изображений открывают новые возможности для исследования взаимосвязей «структура свойства».

Цель настоящей работы – разработка метода математического описания микроструктур перлитных сталей для их количественной оценки.

Анализ литературных данных, посвященных обработке микроструктур сплавов, показывает, что термин «математическая модель микроструктуры» не является установившимся. Это связано с тем, что с микроструктурами сплавов в металловедении и металлофизике по-прежнему работают традиционными методами, т. е. их используют для оценки межкристаллитных зерен, формы и разме-

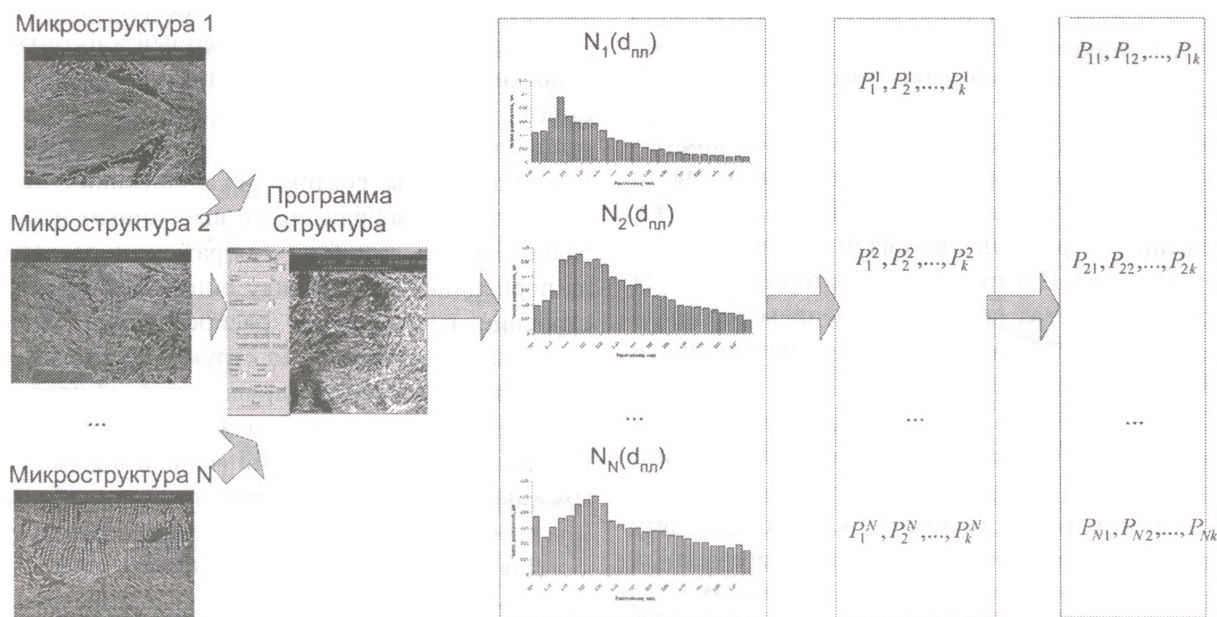


Рис. 1. Этапы построения математической модели для описания микроструктур перлитной стали

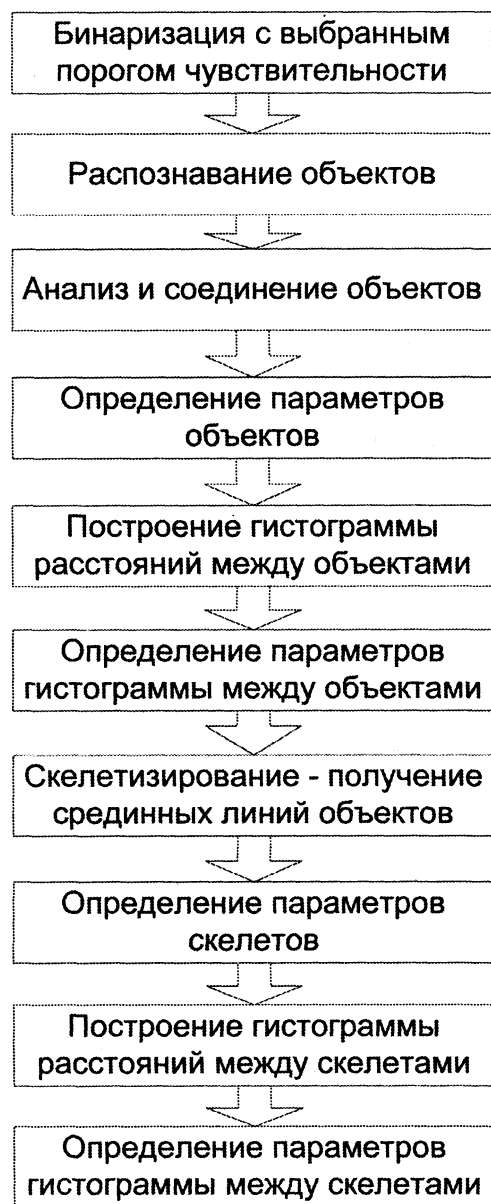


Рис. 2. Алгоритм компьютерной обработки микроструктуры с целью получения ее математической модели

ра фаз. Причем эта информация, как правило, носит качественный характер. В литературе часто можно увидеть неравновесные микроструктуры, содержащие зерна, по площади отличающиеся в несколько раз. И в то же время авторы пытаются объяснить свойства сплава изменением зеренной структуры, не проводя расчеты погрешности в определении площади зерна.

Хорошо известно, что «изображение микроструктуры» содержит в себе гораздо больше информации, чем традиционно используют металловеды в своих научных исследованиях. Поэтому основная проблема в использовании современных методов обработки микроструктуры состоит в замене «изображения микроструктуры» набором количественных параметров.

Рассмотрим определение математической модели. Математическая модель – это такая мысленно представленная и материально реализованная система, которая, отображая или производя объект исследования, способна замещать его так, что ее изучение дает новую информацию об объекте [1]. Моделирование как метод исследования основан на замещении конкретного объекта (образца) другим ему подобным (моделью). В данном случае речь идет о замене изображения микроструктуры математической моделью, которая отражает основные свойства изображения фазовых составляющих. В качестве основного свойства математической модели микроструктуры в настоящей работе выбрано межпластинчатое расстояние эвтектоидных колоний.

Таким образом, сущность предлагаемого подхода состоит в том, что изображение микроструктуры заменяется математической моделью (функциональной зависимостью), которая отражает особенности исследуемого свойства микроструктуры. В качестве такого свойства выбрано межпластинчатое расстояние пространственно распределенных эвтектоидных колоний перлита «феррит-цементит». Для разработки математического описания микроструктур предлагается структурно-логическая схема обработки микроструктур (рис. 1). Как видно из рисунка, на первом этапе для микроструктуры строится зависимость числа элементов эвтектоидной колонии от величины межпластинчатого расстояния  $N(d_{пл})$ . На следующем этапе вводятся параметры математической модели в виде функции  $N(d_{пл})$ , которые и характеризуют основные особенности изменения эвтектоидных колоний по микрошлифу.

На рис. 2 показан укрупненный алгоритм обработки изображения микроструктуры перлитной стали, используемый для построения математической модели. Алгоритм компьютерной обработки микроструктуры состоит из следующих этапов: бинаризация изображения с выбранным порогом; распознавание линий на изображении; расчет числа перпендикуляров между линиями перлита; построение гистограммы распределения межпластинчатого расстояния по структуре в целом; скелетизирование распознанных линий изображения; подсчет перпендикуляров между скелетами линий; построение математической модели в виде гистограммы распределения межпластинчатых расстояний между скелетами по всей микроструктуре.

Для построения математической модели микроструктур были использованы микроструктуры катанки перлитной стали, получаемой на РУП «БМЗ». На рис. 3 показаны микроструктуры, взя-

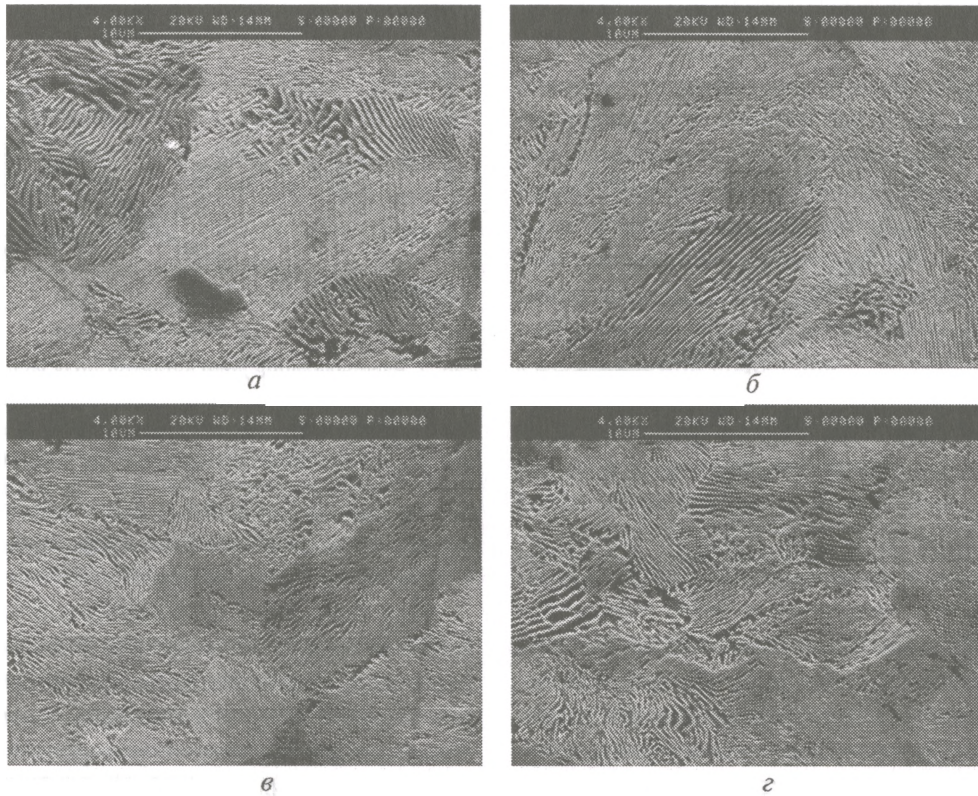


Рис. 3. Микроструктуры образца 4 для плавки 1

тые из различных участков образца и соответствующие одной плавке из стали 80. Для каждой из этих микроструктур, используя алгоритм представленный на рис. 2, были рассчитаны функциональные зависимости вида  $N = F(d_{пл})$  (рис. 4). Для исследования устойчивости математической модели микроструктуры перлитной стали был определен доверительный интервал для четырех микрофотографий (рис. 5). Как видно из рисунка, разброс характеристик межпластинчатых расстояний эвтектоидной колонии находится в интервале, не превышающем 3,5%. Это свидетельствует об удовлетворительном математическом описании микроструктуры и возможности ее использования для практических целей.

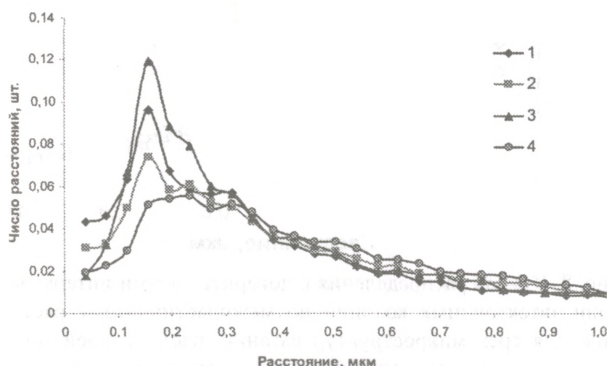


Рис. 4. Частотное распределение доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для микроструктур (1, 2, 3, 4) образца 4 плавки 1 РУП «БМЗ»

Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для решения конкретных прикладных задач. В промышленном производстве РУП «БМЗ» в процессе волочения из катанки изготавливают бортовую проволоку, причем, что одним из дефектов этой проволоки является дефект типа «расслой», проявляющийся в возникновении излома в виде «спирали» или «ступеньки». При производстве катанки исследуют микроструктуры перлитной стали и определяют межпла-

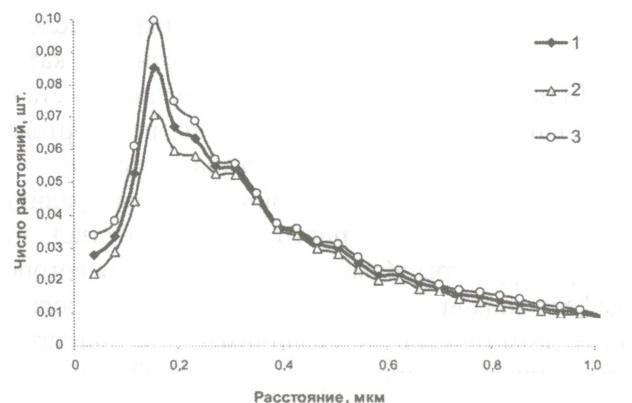


Рис. 5. Частотное распределение доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для микроструктуры образца 4 плавки 1 РУП «БМЗ»: 1 – среднее значение характеристики эвтектоидных колоний, рассчитанное по микроструктурам, приведенным на рис. 3; 2 – нижнее значение доли эвтектоидных колоний в микроструктуре; 3 – верхнее значение доли эвтектоидных колоний в микроструктуре

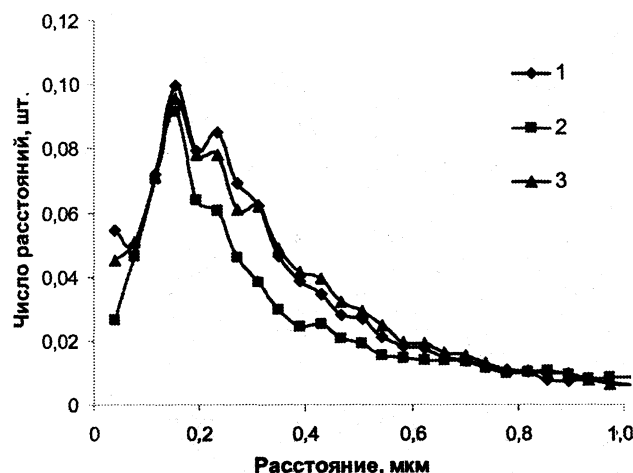


Рис. 6. Частотное распределение доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для трех микроструктур (1, 2, 3) катанки, наследующей микроструктуру, при которой в бортовой проволоке не образуется дефект типа «расслой»

стинчатое расстояние. При этом на качественном уровне микроструктуры катанки, которая используется для получения бортовой проволоки, неразличимы, т. е. для катанки фактически с одной и той же микроструктурой получается бортовая проволока, в которой может быть, а может и не быть дефект типа «расслой». В этом случае возникает вопрос: является ли микроструктура катанки, используемой для изготовления проволоки, «одно-родной» и насколько?

Методы математического моделирования, развиваемые в данной работе, позволяют решать задачи такого типа. Для иллюстрации этой задачи на РУП «БМЗ» были отобраны микроструктуры двух вариантов катанки, из которой изготавливают бортовую проволоку. Первый вариант катанки (условно обозначим катанка А) наследует микроструктуру, при которой в изготавливаемой из нее бортовой проволоке не образуется дефект типа «расслой». Вторая группа катанки (условно обозначим катанка Б) наследует 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 микроструктуры образцов из катанки, для которой дефект типа «расслой» проявляется и не проявляется, практически не различимы, т. е. «видимых изменений» в микроструктуре нет. Однако компьютерный анализ, проведенный с целью обработки изображений микроструктур катанки А и Б, приводящей и не приводящей к дефекту «расслой», показал, что математические модели этих микроструктур являются разными. Следовательно, микроструктуры катанки, приводящей и не приводящей к дефекту типа «расслой», можно разделять

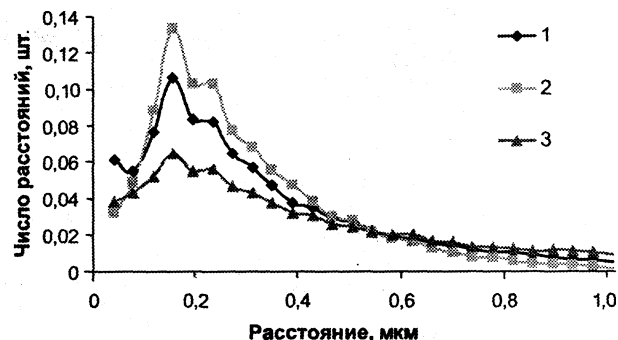


Рис. 7. Распределение доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для трех микроструктур катанки (1, 2, 3), наследующей микроструктуру, при которой в бортовой проволоке образуется дефект типа «расслой»

на два класса. Первый класс включает микроструктуры катанки, приводящей к расслою, второй класс – не приводящей к расслою.

Для каждой из отобранных микроструктур катанки условных классов А и Б были рассчитаны частотные распределения по межпластинчатым расстояниям. На рис. 6 представлены математические модели (частотные распределения по межпластинчатым расстояниям) микроструктур для катанки класса А, которая не приводит к образованию дефекта «расслоя». На рис. 7 приведены математические модели (частотные распределения по межпластинчатым расстояниям) микроструктур для катанки класса Б, которая приводит к образованию дефекта «расслоя».

Для сравнительного анализа микроструктур на следующем этапе по трем частотным кривым для микроструктур (рис. 6, 7) были рассчитаны средние частотные распределения по межпластинчатым расстояниям. На рис. 8, 9 показаны усредненные математические модели микроструктур с рас-

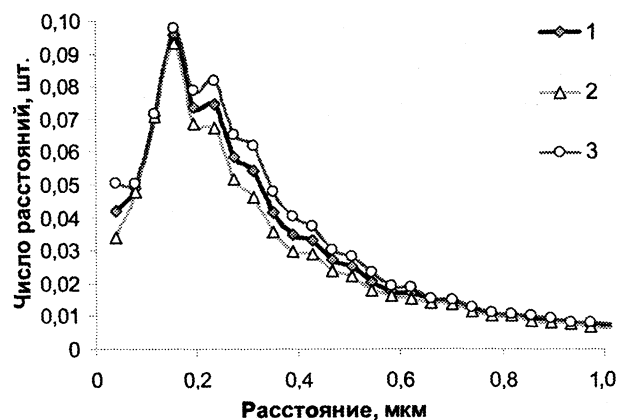


Рис. 8. Кривая распределения с доверительными интервалами доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для трех микроструктур катанки, наследующей микроструктуру, при которой в бортовой проволоке не образуется дефект типа «расслой»: 1 – усредненное распределение; 2 – нижняя граница доверительного интервала распределения; 3 – верхняя граница доверительного интервала распределения

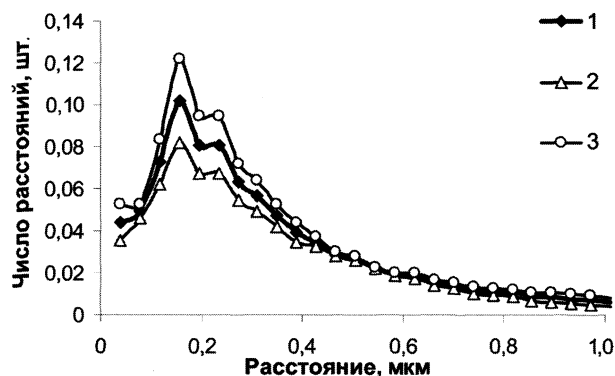


Рис. 9. Кривая распределения с доверительными интервалами доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для трех микроструктур катанки, наследующей микроструктуру, при которой в бортовой проволоке образуется дефект типа «расслой»: 1 — усредненное распределение; 2 — нижняя граница доверительного интервала распределения; 3 — верхняя граница доверительного интервала распределения

считанными доверительными интервалами для катанки, приводящей и не приводящей к дефекту типа «расслой». Сравнивая рассчитанные доверительные интервалы, можно сделать вывод о том, что микроструктура катанки, приводящей к дефек-

ту типа «расслой», имеет больший разброс частотных характеристик для эвтектоидных колоний по межпластинчатым расстояниям, чем катанка, не приводящая к дефекту типа «расслой». Данный результат может свидетельствовать о том, что катанка класса А, наследующая микроструктуру, не приводящую к дефекту типа «расслой», имеет более однородное распределение с точки зрения межпластинчатых расстояний эвтектоидных колоний в стали, чем катанка класса В, приводящая к дефекту типа «расслой».

Как видно из представленных распределений, сравнительный анализ частотных распределений эвтектоидных колоний позволяет оценивать степень неоднородности микроструктур стали.

Таким образом, предложенный математический подход к исследованию микроструктур сталей 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.