



The algorithm for mathematical description of the pearlitic steels microstructures is offered. It is shown that the mathematical models of microstructures, constructed with use of frequency distributions of eutectoid colonies of pearlitic steels by inter-plate distances, enable to estimate the degree of microstructure heterogeneity.

А. Н. ЧИЧКО, О. А. САЧЕК, В. Ф. СОБОЛЕВ, БНТУ, А. В. ВЕДЕНЕЕВ,
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

УДК 669.27:519

О НОВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ АНАЛИЗА СТРОЕНИЯ ЭВТЕКТОИДНЫХ КОЛОНИЙ ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

Известно, что эвтектоидные колонии, образовавшиеся после распада аустенита перлитных сталей, полученных в неравновесных условиях, неоднородно распределены 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 параметрами 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 металлургии, да и металлофизике по-прежнему работают традиционными методами, описанными в стандартах. Причем эта информация, как правило, носит качественный характер. На страницах журналов часто можно увидеть неравновесные микроструктуры, содержащие зерна, по площади, отличающиеся в несколько раз. И в то же время авторы пытаются объяснить свойства сплава изме-

нением зеренной структуры, не проводя расчеты погрешности в определении площади зерна.

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

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 данной 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 следующая структурно-логическая схема обработки микроструктур (рис. 1). Как видно из рисунка, на первом этапе для M микроструктур строятся зависимости числа элементов эвтектоидной колонии от величины межпластинчатого расстояния $N_i(d_{пл})$ ($i = 1, M$). На следующем этапе вводятся параметры матема-

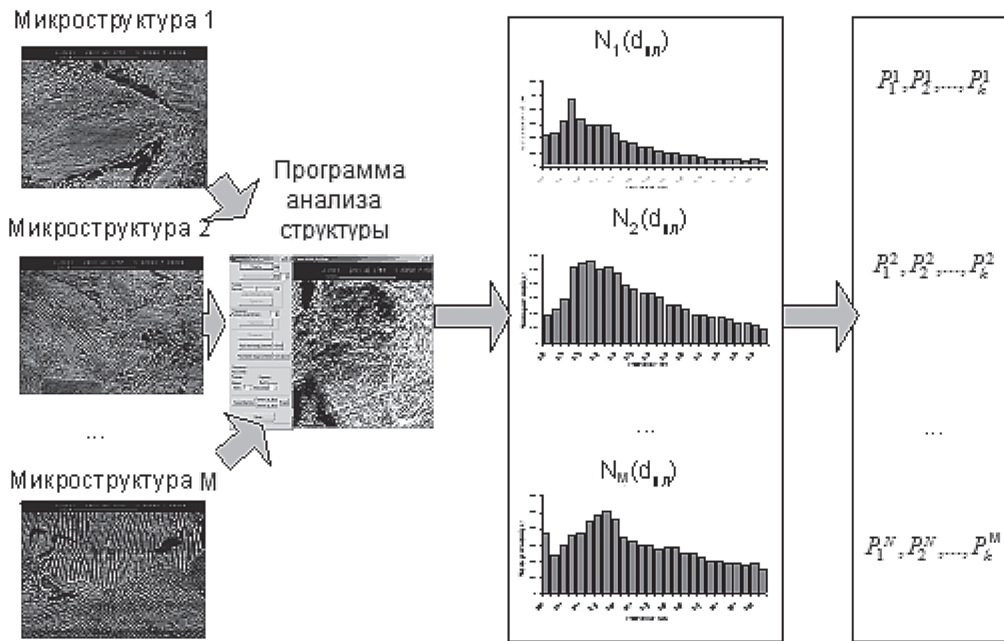


Рис. 1. Этапы построения математической модели для описания микроструктур перлитной стали

тической модели, определяемые на базе значений функций $N_i(d_{пл})$, P_i^j (индекс i указывает номер параметра, индекс j – номер изображения микроструктуры), которые и характеризуют основные особенности изменения эвтектических колоний по микрошлифу.

На рис. 2 приведен укрупненный алгоритм обработки изображения микроструктуры перлитной стали, используемый для построения математической модели. Алгоритм компьютерной обработки

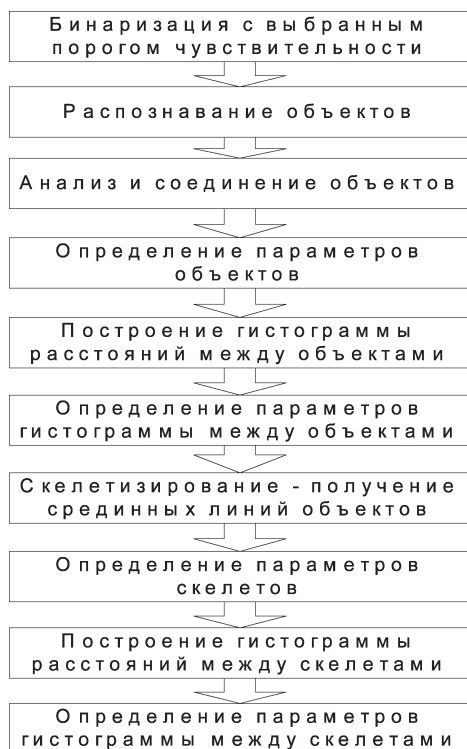


Рис. 2. Алгоритм компьютерной обработки микроструктуры с целью получения ее математической модели

микроструктуры состоит из следующих этапов: бинаризации изображения с выбранным порогом; распознавания линий на изображении; расчета числа межпластинчатых расстояний и толщин собственно ферритных и цементитных прослоек; построения гистограммы распределения межпластинчатых расстояний по площади исследуемого сечения; скелетизирования распознанных линий изображения; подсчета перпендикуляров между скелетами линий; построения математической модели в виде гистограммы распределения межпластинчатых расстояний между скелетами по всей микроструктуре. Построение скелета объекта растрового бинарного изображения производится путем циклического повторения операции «истончения». С каждой итерацией со всех сторон объекта «убирается» однопиксельный граничный слой, до тех пор, пока объект не превратится в набор тонких однопиксельных линий.

Для построения математической модели микроструктур были использованы микроструктуры катанки перлитной стали, получаемой на БМЗ. На рис. 3 представлены микроструктуры, взятые из различных участков образца и соответствующие одной плавке из стали 80. Для каждой из этих микроструктур, используя алгоритм (см. рис. 2), были рассчитаны функциональные зависимости вида $N = F(d_{пл})$, которые построены на рис. 4. Для исследования устойчивости математической модели микроструктуры перлитной стали был рассчитан доверительный интервал для четырех микрофотографий (рис. 5). Как видно из рисунка, разброс характеристик межпластинчатых расстояний эвтектической колонии находится в интервале, не превы-

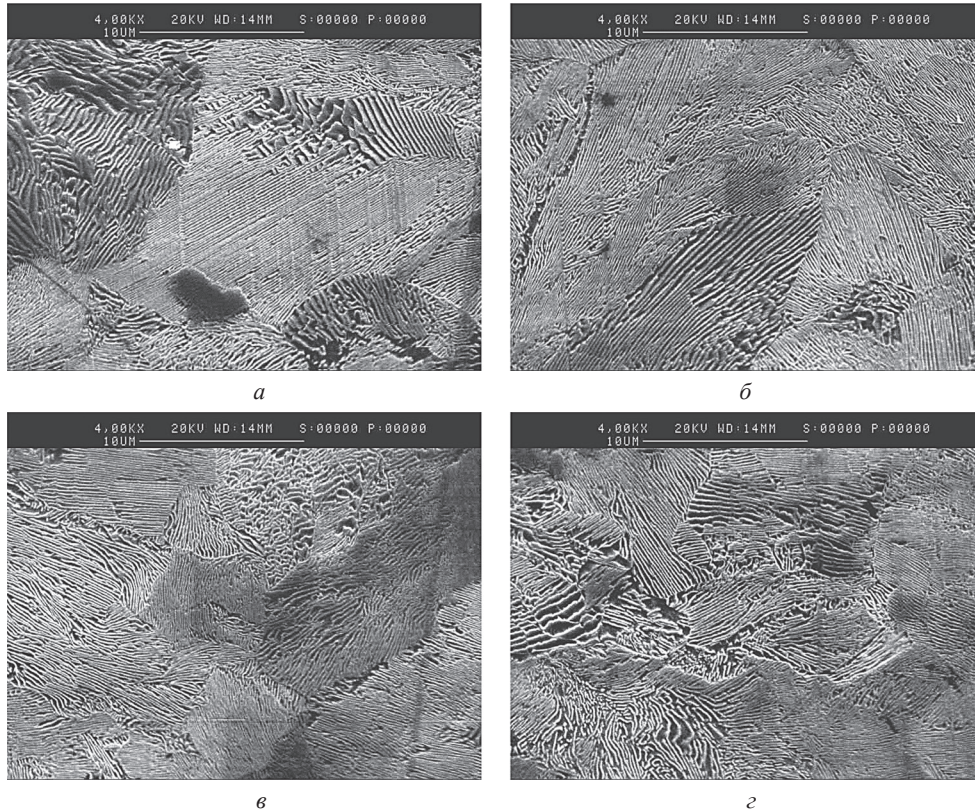


Рис. 3. Фотографии микроструктур для плавки 1 образца 4

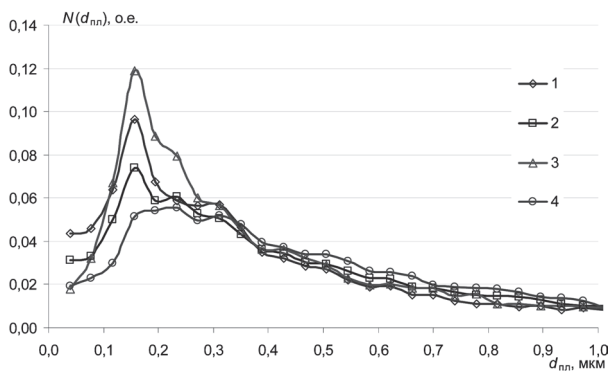


Рис. 4. Частотное распределение доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для микроструктур 1, 2, 3, 4 образца 4 плавки 1

шающем 3,5%. Это свидетельствует об удовлетворительном математическом описании микроструктуры и возможности ее использования для практических целей.

Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для решения конкретных прикладных задач. В промышленном производстве БМЗ в процессе волочения из катанки изготавливают бортовую проволоку. 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 межпластинчатое расстояние. При этом на качественном уровне микро-

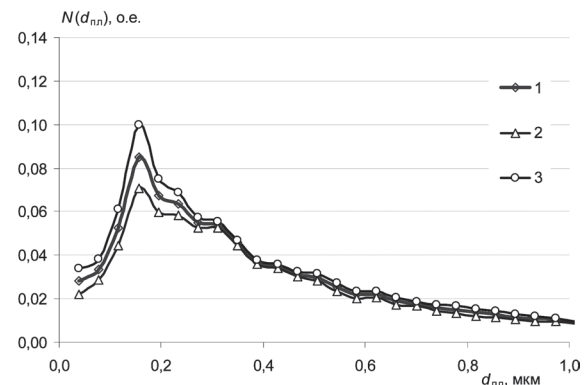


Рис. 5. Частотное распределение доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для микроструктуры образца 4 плавки 1: 1 – среднее значение характеристики эвтектоидных колоний, рассчитанное по микроструктурам (см. рис. 3, а, б, в, г); 2 – нижнее значение доли эвтектоидных колоний в микроструктуре; 3 – верхнее значение доли эвтектоидных колоний в микроструктуре

структуры 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 дефект типа «расслой», а может и не быть его. В этом случае возникает вопрос: а является ли микроструктура катанки, используемой для изготовления проволоки, «однородной» и на сколько?

Методы математического моделирования, развиваемые в настоящей работе, позволяют решать

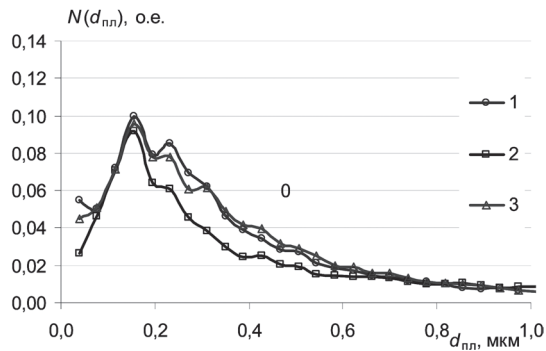


Рис. 6. Частотные распределения доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для трех микроструктур (1, 2, 3) катанки, наследующей микроструктуру, при которой в бортовой проволоке не образуется дефект типа «расслой» (класс А)

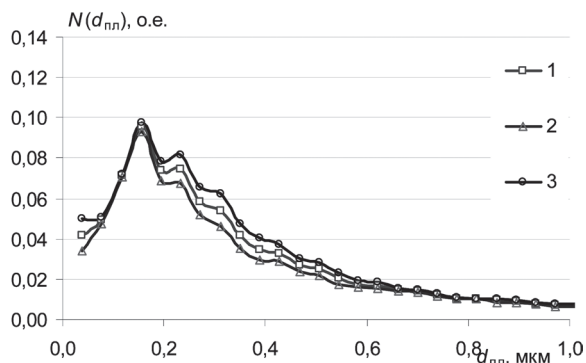


Рис. 8. Рассчитанная кривая распределения с доверительными интервалами доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для трех микроструктур катанки, наследующей микроструктуру, при которой в бортовой проволоке не образуется дефект типа «расслой» (класс А): 1 – усредненное распределение; 2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

такого типа задачи. Для этого на 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 неразличимы, 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

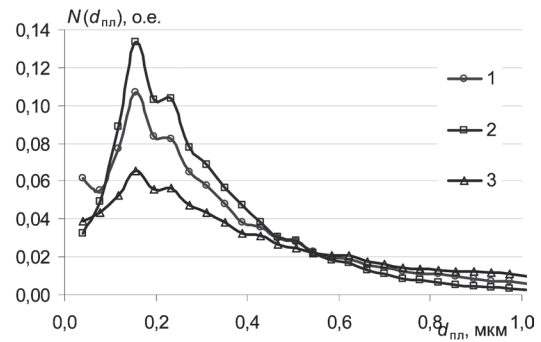


Рис. 7. Частотные распределения доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для трех микроструктур катанки (1, 2, 3), наследующей микроструктуру, при которой в бортовой проволоке образуется дефект типа «расслой» (класс Б)

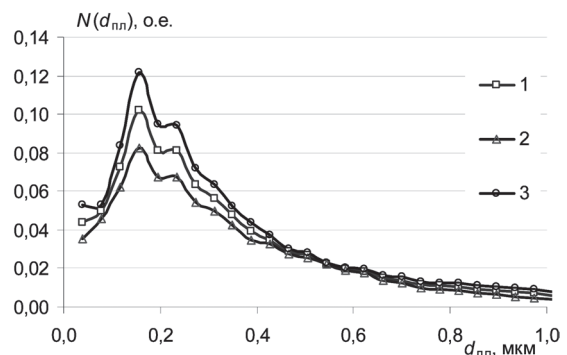


Рис. 9. Рассчитанная кривая распределения с доверительными интервалами доли эвтектоидных колоний по межпластинчатому расстоянию для трех микроструктур катанки, наследующей микроструктуру, при которой в бортовой проволоке образуется дефект типа «расслой» (класс Б): 1 – усредненное распределение; 2 – нижняя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

микроструктур являются разными. Следовательно, микроструктуры катанки, приводящей и не приводящей к дефекту типа «расслой», можно разделять на два класса. Первый класс включает микроструктуры катанки, приводящей к расслою, второй класс – микроструктуры катанки, 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 – 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 сред-

ние частотные распределения по межпластинчатым расстояниям. На рис. 8, 9 приведены усредненные математические модели микроструктур с рассчитанными 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 дефекту 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 *A*, наследующая микроструктуру, не приводящую к дефекту типа «расслой», имеет более однородное рас-

пределение с точки зрения межпластинчатых расстояний эвтектоидных колоний в стали, чем катанка класса *B*, приводящая к дефекту типа «расслой».

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

Таким образом, представленный 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.