

УДК 681.3

С.И. Шарыбин., А.В. Ключев, В.Ю. Столбов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНОЙ ЗЕРНОВОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Аннотация. Описывается алгоритм идентификации параметров сложных зерновых структур металлов и сплавов. Приведены примеры обработки и анализа фотографий шлифов, подтверждающие возможность применения разработанного алгоритма для идентификации параметров сложных зерновых структур.

Ключевые слова: анализ шлифов, зерновые микроструктуры, идентификация параметров.

COMPLEX GRAIN STRUCTURE OF METALS AND ALLOYS IDENTIFICATION

Abstract. Describes identifying complex grain structures on metals and alloys sections algorithm. Example results of section picture processing and analysis, which confirms possibility of usage developed algorithm for complex grain structures parameter identification.

Keywords: section analysis, grain microstructures, parameter identification.

В данной работе рассматривается задача идентификации характеристик зерновых структур по имеющемуся множеству шлифов металлов и сплавов. Под идентификацией здесь понимается определение численного значения различных параметров зерновой структуры автоматизированным способом.

Идентификация параметров является заключительным этапом анализа микроструктур шлифа, перед которым следует подготовка материала и самого шлифа, а также проведение классификации шлифа. Классификация может проводиться как ручными, так и автоматическими методами [1]. В данной работе особое внимание будет уделено именно этапу идентификации, безотносительно к тому, как именно была получена фотография зерновой структуры для анализа.

В настоящее время подобная идентификация параметров обычно производится вручную, при использовании различных шаблонов, зачастую даже без привлечения вычислительной техники. Это связано с тем, что существующие программные решения в этой области либо дорогостоящи, либо не решают тех задач, которые возникают при выполнении анализа [2]. Ручные же методы, приведенные, например, в работах [3, 4], дают лишь приближенное представление о структуре металла и его свойствах, а также требуют значительного времени для получения результата.

Существует целый ряд параметров зерновых структур, которые необходимо знать эксперту при проведении анализа шлифа. Эти параметры могут варьироваться в зависимости от того, к какому классу принадлежит изучаемый шлиф, а также от того, какие свойства материала проверяются данным анализом. Чаще всего определяются следующие параметры:

- величина зерна (средний, минимальный, максимальный);
- дисперсия величин зерна;
- степень анизотропии зерен (отклонение от круглой формы);
- плотность распределения зерен;
- ориентация зерен, и др.

Кроме того, существует ряд параметров, не связанных напрямую с зернами, но которые также важны при проведении анализа:

- определение наличия и расположения ферритных фаз;
- определение наличия и расположения перлитных фаз;
- анализ неметаллических включений и др.

Как будет показано далее, все эти характеристики могут быть определены схожими методами.

Вид зерен на фотографиях шлифов [5] варьируется в зависимости от класса, к которому принадлежит этот шлиф. После проведения ручного анализа фотографий было выделено два различных с точки зрения автоматизированной обработки вида зерновых структур. Это могут быть однородные темные области (например, вкрапления углерода на шлифе стали). Либо же зерна могут быть проявлены на фотографии в виде их границ (например, при анализе зернистых перлитов). На рис. 1 представлено сравнение этих двух возможных зерновых структур.

Также результатом этого ручного анализа фотографий является то, что идентификация всех вышеперечисленных характеристик может быть сведена к выделению светлых и темных зон на фотографиях подобного вида (при этом, естественно, трактоваться эти зоны будут по-разному).

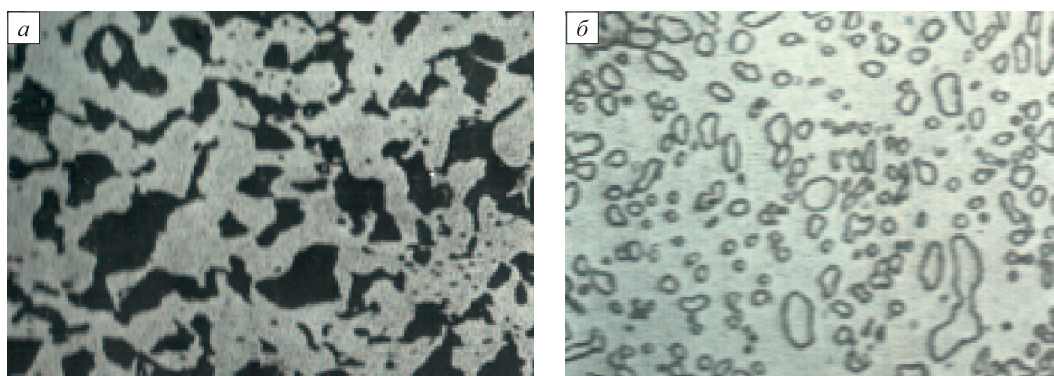


Рис. 1. Вид зерен на шлифах среднеуглеродистой стали, $\times 250$ (а) и зернистого перлита, $\times 2000$ (б)

Целью данной работы является разработка алгоритма автоматизированной идентификации параметров по имеющемуся набору фотографий шлифов металлов с учетом их специфики.

Алгоритм идентификации параметров. Разрабатываемый алгоритм идентификации параметров зерновой структуры разбит на несколько этапов, которые выполняются последовательно:

- предобработка фотографии;
- определение границ зерен;
- аппроксимация границ зерен замкнутыми ломаными линиями;
- подсчет численных характеристик найденных зерен.

В зависимости от вида анализируемой структуры, некоторые этапы алгоритма могут быть пропущены. Например, при анализе ферритных структур при увеличении порядка $\times 250$ границы зерен уже отчетливо видны на фотографии и этап определения границ не имеет актуальности. Также при анализе неметаллических включений, зачастую, зерна уже отчетливо видны и никаких специальных средств для их нахождения применять не требуется (рис. 2)

Далее этапы алгоритма рассмотрены более подробно.

Предобработка фотографии. Целью этапа предобработки фотографии является приведение фотографии к виду, пригодному для его автоматизированной обработки.

Исследование фотографий происходит в пространстве градаций серого, поэтому первым шагом предобработки является приведения фотографии к этому пространству. При этом используются стандартные хроматические коэффициенты [6].

Фотографии шлифов могут быть сделаны с различными параметрами фотокамеры (основным параметром является выдержка), что приводит к различной освещенности фотографии. Визуально на фотографии это может проявиться в виде низкого контраста, что усложняет поиск зерен и делает его менее надежным.

Для компенсации различий в освещенности используется стандартный подход выравнивания гистограммы, описанный в работе [6]. Результатом работы этого алгоритма является изображение, гистограмма которого заполняет весь диапазон величин от 0 до 1.

Одним из негативных эффектов такого масштабирования гистограммы является проявление изначально не столь очевидной зашумленности на фотографии. Для избавления от этого эффекта в рамках решаемой задачи достаточно было применения фильтра уменьшения шума, основанном на локальном среднем значении с ядром 3×3 пикселя [6]. Такое преобразование также несколько размывает границы зерен, что может быть легко скомпенсировано после получения численных характеристик зерен.

Определения границ зерен. Как было описано выше, существует два вида зерен, которые необходимо

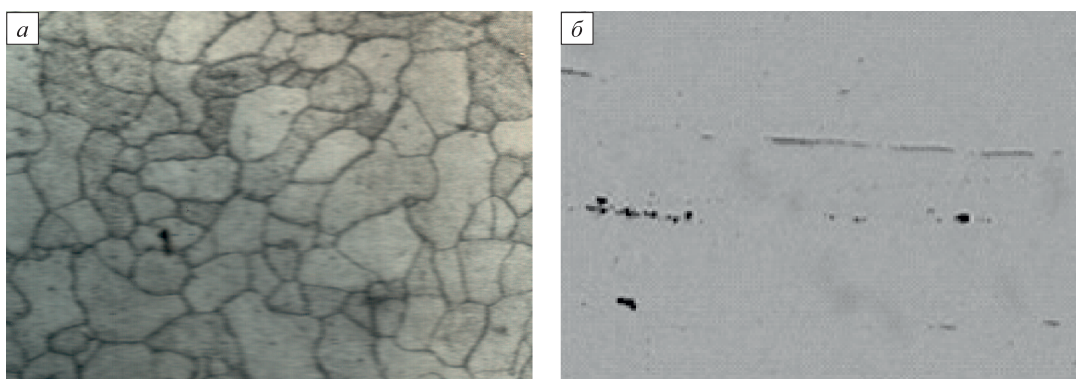


Рис. 2. Феррит, $\times 250$ (а) и неметаллические включения (б)

распознавать. Для того, чтобы эти два типа можно было распознавать единообразно, было принято решение о приведении фотографии шлифа к виду, на котором зерна представляются в виде границ. Для этого используется алгоритм определения границ, основанный на применении матрицы конволюций с ядром преобразования в виде лапласиана [6]. Такое преобразование сводится к замене значения пиксела на скалярное произведение матрицы, построенной из окружающих его пикселей на матрицу ядра преобразования.

Форма границ зерен после применения такого преобразования показана на рис. 3.

Как видно из приведенных примеров, в случае зернистого перлита наблюдается явно выраженная двойная граница. Подобная ситуация может возникнуть и при других видах зерен. Так, при рассмотрении среднеуглеродистой стали, подобная картина может наблюдаться в случае металлических вкраплений в области углерода. Связано это с природой самих зерен – у кольцевидных зерен будет определена как внешняя, так и внутренняя границы.

Подобная ситуация легко разрешается путем использования лишь внешней границы зерна и игнорирования возможных внутренних областей. Такой подход не влияет на точность определения размера и ориентации зерен.

Анализ границ и выделение зерен. Следующим шагом для подсчета характеристик микроструктуры является анализ границ и выделение зерен. На данном этапе работы используется переборный алгоритм, который заключается в обходе всех пикселей изображения по порядку, и при встрече светлого пикселя начинается поиск замкнутой области. При этом пиксели изображения рассматриваются построчно слева направо, строки идут сверху вниз, обход границы происходит по часовой стрелке.

Обход границы происходит итерационным методом, на каждом шаге которого происходит поиск следующего пикселя, на который можно осуществить переход. В качестве возможных альтернатив рассматриваются все соседние с текущим светлые пиксели. Альтернативы рассматриваются внутри небольшой области разме-

ра 5×5 пикселей. Для уменьшения влияния возможных оставшихся шумов на изображении размер этой области может быть изменен.

При обходе сохраняются координаты пикселей, которые принадлежат границе и которые позднее используются для подсчета характеристик зерновой структуры. Таким образом, после завершения работы этого шага алгоритма существует массив данных, который описывает все найденные зерна. Зерна представляются как многоугольники, у которых известны координаты всех вершин в порядке обхода против часовой стрелки.

Подсчет численных значений параметров зерна.

Следующим шагом алгоритма является подсчет численных значений характеристик зерен. Набор таких характеристик также зависит от типа анализируемой структуры. Далее будет приведен список и описание всех численных характеристик, которые могут быть распознаны автоматизированной системой.

Ориентация зерна отождествляется с направлением прямой, проходящей через наиболее удаленную от геометрического центра точку на границе зерна и его геометрический центр.

Размер зерна считается по двум направлениям – одно из них это размер зерна по направлению ориентации зерна, второй размер считается в ортогональном направлении.

Для нахождения численных значений размера используется ограничивающий прямоугольник, направленный вдоль зерна (рис. 4). С точки зрения реализации это эквивалентно повороту зерна таким образом, что он становится горизонтально ориентированным, и нахождению минимальных и максимальных значений по осям X и Y . Разница между максимальным и минимальным значением по горизонтали составляет размер зерна вдоль его направления (длина a большой оси эллипса на рис. 4), разница по вертикали – вдоль направления, перпендикулярного ориентации зерна (длина b малой оси эллипса на рис. 4).

Для определения анизотропии зерна сравнивается его размер вдоль и поперек направления зерна. Степенью анизотропии считается среднее значение отноше-

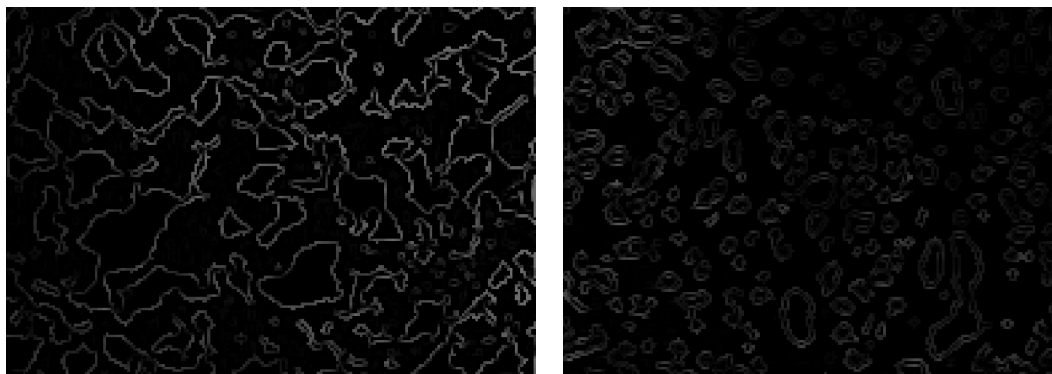


Рис. 3. Границы зерен после применения матрицы конволюций в виде лапласиана

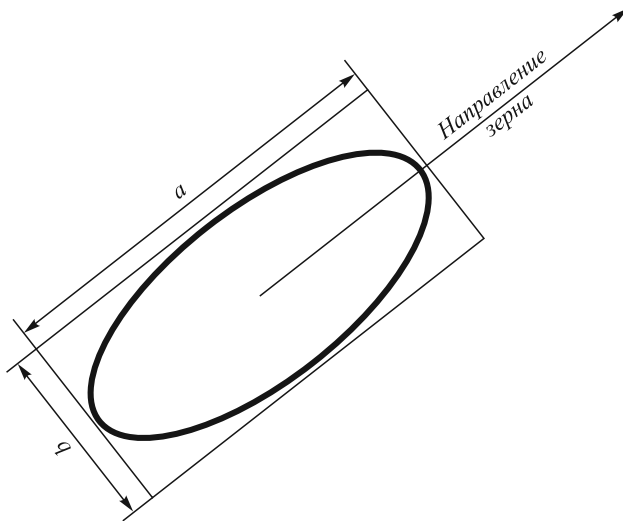


Рис. 4. Ограничивающий прямоугольник, используемый для определения размера и ориентации зерна

ния величины зерна вдоль его вертикали и горизонтали (b/a).

При анализе неметаллических включений (см. рис. 2, б), которые определяются по яркостным характеристикам (этапы определения и обработки границ зерен пропускаются), площадь зерен определяется волновым методом [7].

Следует отметить, что данная часть разрабатываемой автоматизированной системы не строит предположений о том, какой вид структуры анализируется, и набор численных характеристик определяется вручную. В дальнейшем набор идентифицируемых характеристик также будет определяться автоматически с использованием интеллектуальных технологий [1].

Результат этапа идентификации зерен приведен на рис. 5.

В качестве примера результата обработки численных параметров зерен на рис. 6 приведена гистограмма распределения средних размеров зерен на рассматриваемом шлифе среднеуглеродистой стали.

Размер зерна на этой гистограмме приведен в пикселях, который в итоговой реализации автоматически переводится в доли миллиметра.

Выводы. Разработан алгоритм идентификации параметров зерновых структур на фотографиях шлифов металлов, который позволяет определять все основные характеристики, необходимые при анализе шлифа металлов.

Приведены примеры обработки и анализа фотографий шлифов, подтверждающие возможность применения разработанного алгоритма для идентификации параметров сложных зерновых структур.

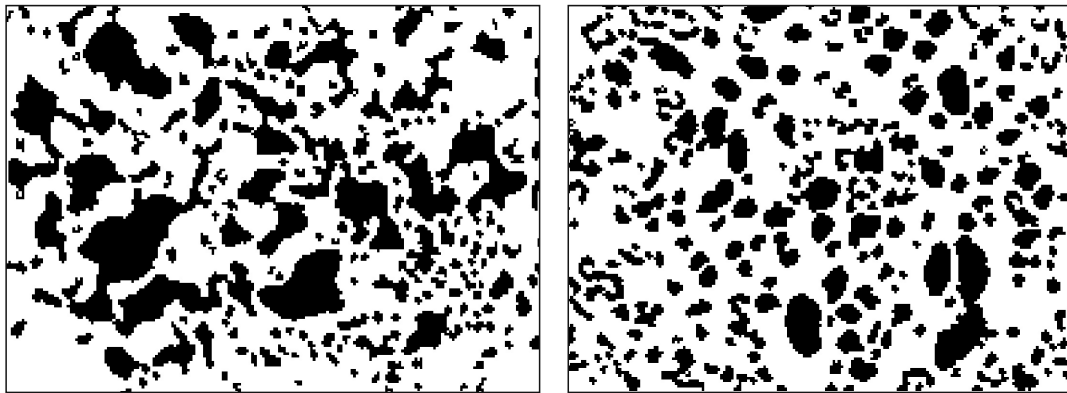


Рис. 5. Зерна, идентифицированные предложенным алгоритмом

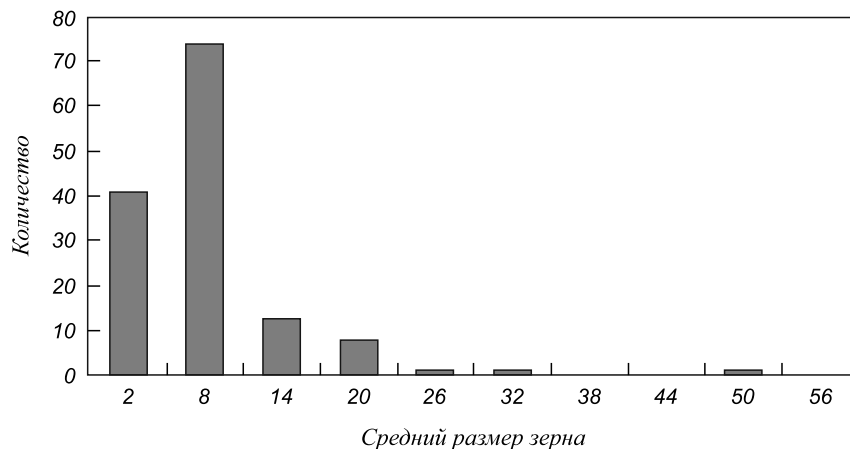


Рис. 6. Гистограмма распределения средних размеров зерен на шлифе среднеуглеродистой стали

На данном этапе набор характеристик задается вручную, но планируется интегрировать его в автоматизированную систему классификации структур, описанную в работе [1]. Также планируется развитие алгоритма для его возможного использования при контроле соответствия зерновой структуры в задачах управления технологическими процессами изготовления материалов с заданными свойствами на мезо- и микроуровнях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарыбин С.И., Ключев А.В., Столбов В.Ю. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 9. С. 49 – 53.

2. Мартюшев Н.В. // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5.
3. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. – М.: Металлургия, 1983. – 384 с.
4. Лаборатория металлографии / Е.В. Панченко, Ю.А. Скаков, Б.И. Кример и др. – М.: Металлургия, 1965.
5. Металлография железа. Т. 1, 2. (с атласом микрофотографий). – М.: Металлургия, 1972. – 440 с.
6. Shih Frank. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. IEEE Press, 2010. – 537 p.
7. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. – М.: Вильямс, 2005. – 1296 с.

© 2013 г. С.И. Шарыбин., А.В. Ключев, В.Ю. Столбов
Поступила 22 декабря 2012 г.

УДК 669.14-154:669.0.94.3

Б.Н. Окорочков

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕННОГО ПРИНЦИПА ЛЕ-ШАТЕЛЬЕ–БРАУНА К ПРОЦЕССУ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЕ. ЧАСТЬ II

Аннотация. Наибольшее значение для практического управления конверторным процессом представляет частота колебания ΔV_C , обусловленная процессами взаимодействия между кислородным факелом, шлаковой и металлической фазами в реакционной зоне. Это подтвердили эксперименты по изучению переходных процессов по каналам $H_\phi \rightarrow \Delta V_C$, $V_{O_2} \rightarrow V_C$ и шлакообразующие V_C . Канал $V_{O_2} \rightarrow V_C$ четко реагирует на изменение расхода кислорода и скорость окисления углерода с динамическими характеристиками, обусловленными технологическими параметрами шлаковой фазы. Представлено теоретическое обоснование использования периодических воздействий по каналу «расход кислорода продувки – скорость окисления углерода». Предлагаемый метод управления продувкой позволяет полностью избавиться процесс от возникновения выбросов, улучшает процесс ассимиляции шлаковой фазой вредных примесей серы и фосфора, уменьшает потери металлической фазы, стабилизирует процесс продувки в целом. Результаты подтверждены промышленной эксплуатацией. Главной проблемой внедрения разработанного метода является обеспечение нормальной технической эксплуатации тракта отходящих газов (в первую очередь, системы регулирования объема отходящих газов).

EXPANDED LE-SHATELLIE-BROWN PRINCIPLE APPLICATION TO CARBON OXIDATION PROCESS IN LD BATH. PART II

Abstract. ΔV_C oscillation frequencies, caused by interaction processes between oxygen torch, slag and metallic phases in reaction zone, are of greatest importance for practical control over oxygen furnace process. This was proved in course of experiments to study the transient processes in $H_\phi \rightarrow \Delta V_C$, $V_{O_2} \rightarrow V_C$, and slag-forming V_C channels. $V_{O_2} \rightarrow V_C$ channel strictly reacts to oxygen consumption fluctuation and carbon oxidation velocity with dynamic characteristics, determined by technological parameters of the slag phase. The theoretical basis of use of periodic impacts in the channel “purging oxygen consumption – carbon oxidation velocity” channel is presented. Proposed purge management method allows to completely rid the process from emissions probability, improves the assimilation of sulfur and phosphorus contaminants in slag phase, decreases metallic phase losses, and stabilizes the purging process on the whole. The results are confirmed by industrial exploitation. The major issue of the designed method industrial application is to ensure normal technical operations of exhaust gases path (primarily, exhaust gases volume regulation system).

Сферой вмешательства в процесс через внешние воздействия были выбраны структуры средних частот колебания ΔV_C системы «шлак – металл – реакционная зона (РЗ)» ([1], рис. 9).

Анализ переходных процессов по каналам «расход кислорода – скорость окисления углерода», «положение фурмы – скорость окисления углерода» и «присадка извести – скорость окисления углерода» показал правильность выбранного диапазона гармонических

колебаний спектра и позволил сделать заключение о том, что вмешательство наиболее эффективно на этих частотах по каналу «расход кислорода – скорость окисления углерода» [2, 3].

Этот канал позволяет непосредственно влиять на устанавливающееся в конвертерной ванне стационарное неравновесное состояние. Это состояние, как и равновесное для закрытой системы является асимптотически устойчивым [4 – 6]. Поэтому к нему применим