



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2012-19-4-70-79>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЛЛА ЗЕРНА

Р.П. БОГУШ, Е.Р. АДАМОВСКИЙ, С.Ф. ДЕНИСЁНОК

Полоцкий государственный университет (г. Новополоцк, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 10 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Представлено алгоритмическое обеспечение для предварительной обработки и дальнейшего анализа изображений микроструктуры металлов, реализующее металлографические методы: сравнение с эталонными шкалами; подсчет зерен на микрошлифе, который используется только для равноосных зерен; подсчет пересечения границ зерен, свободный от данного ограничения; измерения хорд. В качестве исходных данных может использоваться заданное количество цифровых изображений шлифа. Предварительная обработка применяется для удаления шума, выравнивания яркости, улучшения контраста с использованием алгоритма адаптивной эквализации гистограммы с ограничением контрастности, который позволяет улучшить результативность дальнейшего анализа. Далее выполняется сегментация зерен. Для этого используется комбинация методов адаптивной бинаризации, дистанционного преобразования и водораздела. Предусмотрена фильтрация бинарных изображений на основе операций математической морфологии. Для определения границ зерен используется контурный анализ. Представлены результаты исследований, которые проведены на изображениях эталонных шкал, отображающих весь диапазон размеров зерен, и на реальных изображениях микрошлифов. Эксперименты подтвердили высокую результативность работы алгоритмического обеспечения. На основе предложенных алгоритмов разработано программное обеспечение, которое имеет следующие основные функциональные возможности: калибровка для возможности получения реальных размеров зерен; предварительная обработка изображений в автоматическом или ручном режимах; анализ для определения балла зерна; сохранение результатов в виде отчета в формате jpg. Пакетная обработка предоставляет возможность загрузки последовательности изображений для обработки однотипным алгоритмом.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, сегментация частиц, автоматический анализ структур.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Богуш Р.П., Адамовский Е.Р., Денисёнок С.Ф. Обработка и анализ изображений микроструктуры металлов для определения балла зерна. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 70-79.

PROCESSING AND ANALYSIS OF IMAGES OF MICROSTRUCTURE METALS FOR DETERMINING THE GRAIN POINT

RYKHARD P. BOHUSH, YAGOR R. ADAMOUSKY, SIARGEY F. DENISENAK

Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Submitted 10 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. An algorithmic support for metallographic images preprocessing and analysis is presented. The software product implements metallographic methods for the grain size determination by comparison of rating scales, counting beans, calculation of grain boundaries intersections for equiaxed and elongated grains, measuring a chords length. Multiple digital images can be used as initial data. Pre-processing is used to remove noise, sharpen and improve contrast using Adaptive Contrast-Limiting Histogram Equalization (CLAHE). The next step is grain segmentation. A combination of distance transform and adaptive watershed binarization is used. Binary images filtration based on the operations of mathematical morphology is provided. Contour analysis is used to determine grain boundaries. The study's results of the entire rating scales and on the real metallographic images are presented. High efficiency of an algorithmic support is confirmed by the experiments. The software implementation has the following main features: the ability to calibrate the actual grain size, automatic or manual image preprocessing, grain size analysis with saving the results as a report in jpg format. Batch processing provides the ability to download images for processing with the same type of algorithm.

Keywords: digital image processing, particle segmentation, automatic analysis of structures.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Bohush R.P., Adamousky Y.R., Denisenak S.F. Processing and analysis of images of microstructure metals for determining the grain point. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 70-79.

Введение

Металлографические исследования применяются во многих областях промышленности: металлургия, автомобилестроение, атомная промышленность, энергетика, аэрокосмическая промышленность, научно-исследовательские, изыскательские работы в различных исследовательских и научных центрах, университетах, лабораториях [1]. В качестве исходных данных используется микрошлиф, имеющий особо подготовленную поверхность (выявляется структура при помощи травления, среза) для микроанализа, который в настоящее время представляется в виде цифрового изображения. Проведение анализа изображений металлов требует значительных временных затрат специалиста, поэтому разрабатываются и используются специальные алгоритмы обработки цифровых изображений и программные средства [2–4]. Задача автоматического количественного анализа микроструктуры металлов требует сегментации зерен на изображении шлифа и сводится к выделению на нем замкнутых областей, соответствующих границам зерен. Существующие программные системы требуют достаточно хорошего качества подготовки поверхности микрошлифа, однако применение даже современных автоматических станков не позволяет получить поверхность микрошлифа с полным отсутствием мешающих факторов, наличие которых из-за плохой подготовки образца или неравномерности освещения приводит к снижению точности анализа на сложной микроструктуре изображения [5, 6]. Целью статьи является повышение достоверности определения балла зерна за счет развития алгоритмического обеспечения для обработки и анализа изображений микроструктуры металлов.

Теоретический анализ

При металлографическом анализе используется ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна», который содержит следующие методы: определение величины зерна сравнением с эталонными шкалами; подсчет количества зерен; подсчет пересечений границ зерен; измерения длин хорд. Метод определения величины зерна сравнением с эталонными шкалами основан на визуальном сопоставлении целевого изображения и набора эталонов, которые приведены в ГОСТ 5639-82. Метод подсчета зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, заключается в подсчете всех визуально различимых n зерен на шлифе, при этом алгоритм автоматической обработки должен учитывать необходимость разделения зерен по критерию пересечения границ изображения на внутренние n_1 и граничные n_2 , т. е. пересекающие границы изображения. Метод подсчета пересечений границ равноосных зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра предполагает измерение путем построения двух перпендикулярных линий на характерном месте изображения шлифа и разбиением их на отрезки, ограниченные контурами обнаруженных зерен. Далее необходим подсчет среднего арифметического длин полученных отрезков с последующим сравнением с табличным параметром среднего условного диаметра. Метод подсчета пересечений границ неравноосных зерен отрезками прямых с определением количества зерен в 1 мм^3 отличается от метода, предназначенного для равноосных зерен, необходимостью использования дополнительного изображения, полученного поперек главной оси симметрии. Анализ производится путем вычисления количества пересеченных зерен линией в пересчете на ее длину, равную 1 мм , что позволяет вычислить их число на единицу объема и сравнить результат с параметром, который ставит в соответствие среднее количество зерен на 1 мм^3 и определенный балл зерна в ГОСТ 5639-82.

В работе [4] описан алгоритм сегментации на основе выделения контура зерна по признаку перепада яркости смежных пикселей и обходе найденной границы по кругу. В качестве предобработки производится свертка входного изображения с ядром, позволяющим выделить контуры объектов, в данном случае – оператор Лапласа (также могут быть применены операторы Собеля или Кэнни). Результирующее изображение подвергается бинаризации. Автор отмечает, что возможны ситуации, когда вследствие дефектов шлифа граница зерна не является замкнутой, а возникающие разрывы будут достаточно большими. Это может привести к тому, что одно зерно будет определено как несколько объектов. В [5] представлен подход для предварительной обработки с использованием бинаризации методом Отсу, применением операций замыкания и размыкания для фильтрации бинарного изображения и дальнейшего выделения на нем контуров. В работе [7] представлена общая схема обработки изображения микроструктуры с применением алгоритма «жука» для выделения контуров на изображении. Методы из [5, 7] не позволяют обеспечить качественное выделение контуров на реальных изображениях, что приведет к ухудшению качества анализа. Следовательно, требуется разработка алгоритмического обеспечения, которое за счет улучшенной предварительной обработки входного изображения и применения более эффективных подходов при сегментации зерен позволит повысить точность определения балла зерна.

Алгоритм обработки и анализа изображений микроструктуры металлов

С учетом поставленной задачи повышения достоверности определения балла зерна при металлографическом анализе разработан алгоритм (рис. 1), который для удаления гауссова и импульсного шума применяет двумерную фильтрацию в пространственной области с соответствующими типами фильтров. Известно, что одними из наиболее часто встречаемых дефектов, кроме шумов, являются неоднородная яркость и низкий контраст [5]. В существующих системах определения балла зерна используется метод выравнивания гистограммы. При неоднородности распределения яркостей на входном изображении, например, одна половина его темнее (рис. 2, а), алгоритм выравнивания гистограммы работает недостаточно хорошо, так как на результирующем изображении после данного шага будет наблюдаться улучшение контраста, но одна часть будет темнее, причем перепад яркости может

быть даже более выраженным (рис. 2, *b*). Поэтому предлагается для улучшения результата предварительной обработки использование алгоритма адаптивной эквализации гистограммы с ограничением контраста (CLANE) [8]. При таком подходе изображение обрабатывается не целиком, а по фрагментам, которые после коррекции объединяются с помощью билинейной интерполяции для подавления резких границ перехода между фрагментами. Сравнение рис. 2, *b* и 2, *c* показывает, что при использовании алгоритма CLANE неравномерность освещенности на выходном изображении практически отсутствует, в отличие от изображения, полученного на основе выравнивания гистограммы.

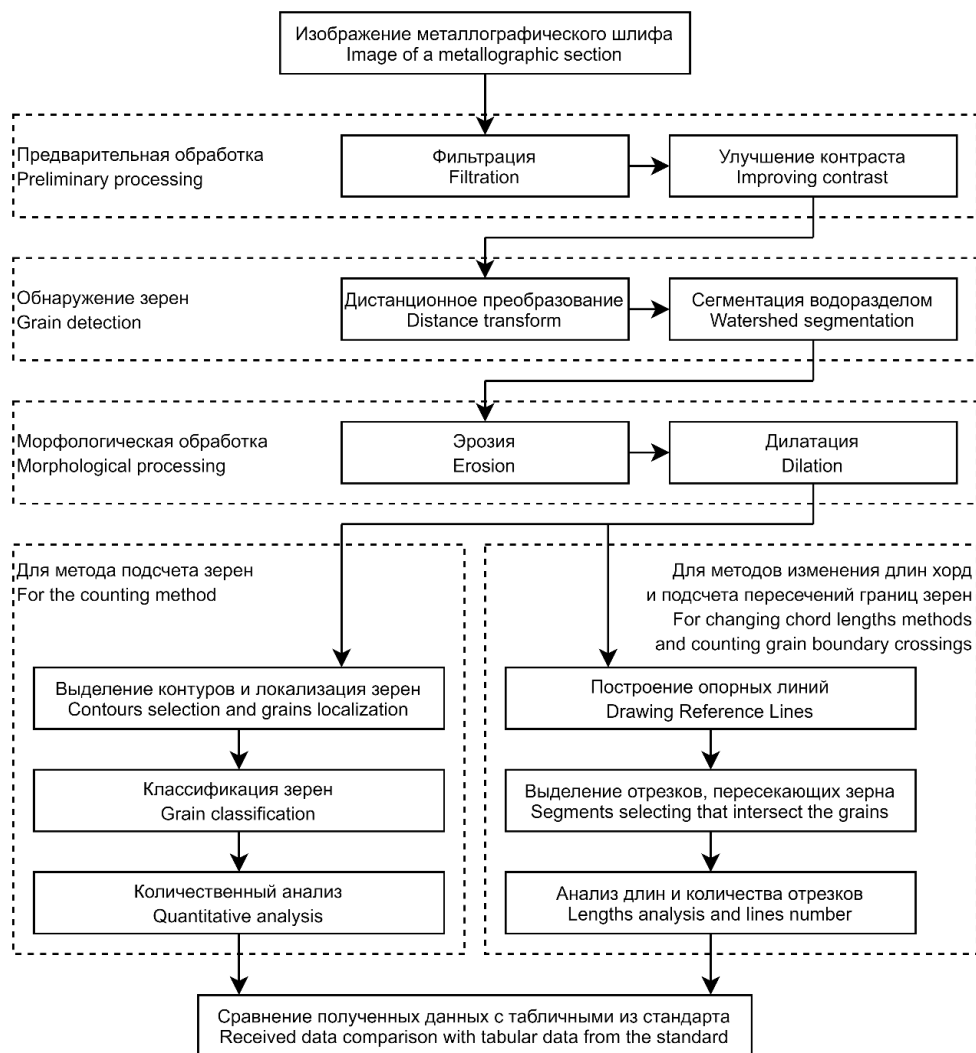


Рис. 1. Общая схема алгоритма обработки и анализа цифровых изображений микрошлифов
Fig. 1. Scheme of algorithm for processing and analyzing digital microsection images

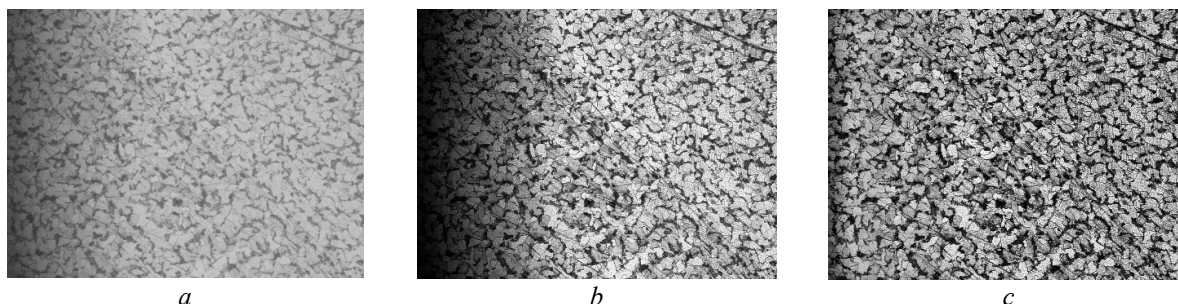


Рис. 2. Примеры улучшения контраста: *a* – исходное изображение; *b* – методом выравнивания гистограммы; *c* – методом адаптивной эквализации гистограммы с ограничением контраста
Fig. 2. Examples of contrast enhancement: *a* – the original image; *b* – based on adaptive histogram equalization; *c* – by contrast limited adaptive histogram equalization

Для обнаружения областей на изображении, которые соответствуют зернам, применяется сегментация водоразделом к результату дистанционного преобразования, полученному после адаптивной бинаризации. Адаптивная бинаризация позволяет уменьшить влияние остаточной неравномерности яркости изображения после предыдущего этапа на результат сегментации. Дистанционное преобразование вычисляет на бинарном изображении расстояние до ближайшего пикселя фона для каждого элемента и возвращает результат в виде изображения в градациях серого, где уровень яркости соответствует вычисленному расстоянию, затем применяется сегментация водоразделом. Такой подход позволяет в значительной мере минимизировать слияние объектов при их взаимном пересечении, что очень важно для повышения точности дальнейшего количественного анализа. Для удаления мелких объектов на полученном бинарном изображении, которые не являются зернами по критерию размера, применяется фильтрация на основе операций математической морфологии. На последнем этапе анализ выполняется в соответствии с применяемыми методами.

Для метода подсчета зерен каждое обнаруженное зерно описывается координатами и площадью, определяется количество n_1 и n_2 , вычисляется общее значение n с последующим его приведением к числу зерен на единицу площади. Полученный результат сравнивается с параметром m из ГОСТ 5639-82, который ставит в соответствие диапазон значений среднего числа зерен на 1 мм^2 и определенный балл зерна.

Для методов измерения длин хорд и подсчета пересечений границ зерен выполняется построение опорных линий, из которых выделяются отрезки в областях их пересечения с зернами с последующим анализом длины. Для метода измерения длин хорд и при подсчете пересечений границ равноосных зерен вычисляется средняя длина отрезков, для неравноосных зерен подсчитывается количество отрезков. Полученные значения сравниваются с табличными параметрами из ГОСТ 5639-82.

Результаты экспериментов и обсуждение

На основе рассмотренного алгоритмического обеспечения разработано программное приложение MGSoft. В приложении реализованы одиночная и пакетная обработка изображений, их автоматизированный анализ, вывод отчетов и калибровка данных. Анализ изображений может выполняться с участием оператора на всех этапах обработки и анализа либо только на этапе предварительной обработки, либо без участия оператора. На рис. 3 представлена форма отчета анализа с помощью метода подсчета зерен.

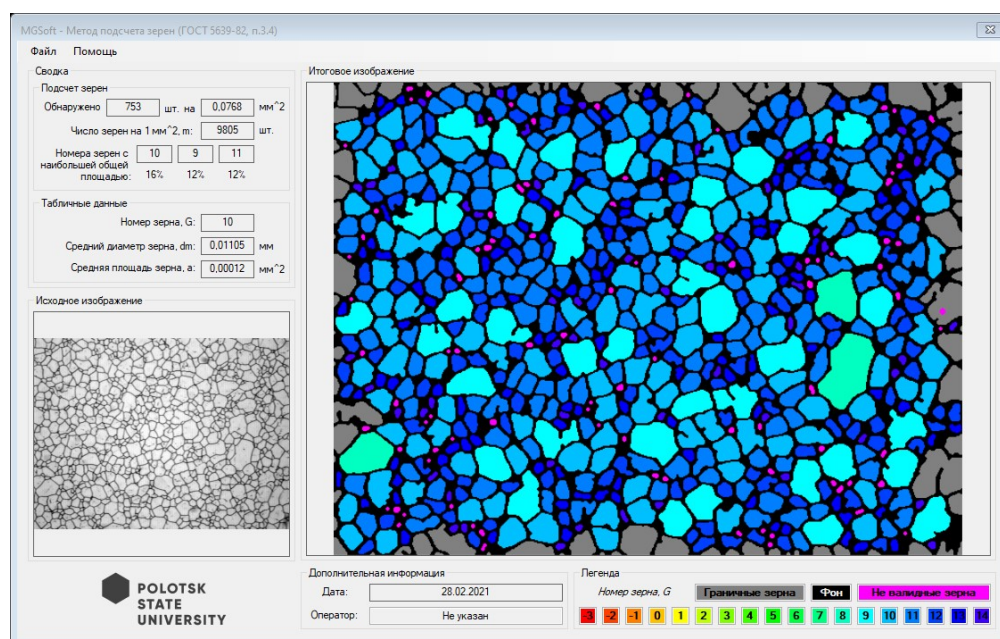


Рис. 3. Форма отчета метода подсчета зерен
Fig. 3. Grain counting method report form

Для проверки алгоритмической и программной реализации методов анализа выполнено тестирование измерения размеров зерен на базовых шкалах приложения 2 ГОСТ 5639-82 в испытательно-исследовательском центре при учреждении образования «Полоцкий государственный университет», сотрудники которого выполняют исследования по комплексному техническому диагностированию технологического оборудования производственных предприятий. Табл. 1 содержит результаты анализа 18 эталонных изображений, каждое из которых содержит структуру, соответствующую одному из номеров зерен, примеры которых показаны на рис. 4. В связи с тем, что в реализации методов по п. 3.5.3 и п. 3.6 ГОСТ 5639-82 используется генератор случайных чисел, измерения с их помощью проведены десять раз, а результаты усреднены. Анализ табл. 1 показывает, что реализованный автоматизированный метод подсчета количества зерен позволяет вычислять практически на всех тестовых изображениях корректный балл зерна. В работе [3] представлены корректные результаты для эталонных шкал для ограниченного диапазона $G = 1..10$, т. е. представленный подход позволяет улучшить результативность определения балльности зерна. Метод подсчета количества пересечений при недостаточно большом числе объектов на изображении завышает или занижает номер зерна на один пункт на граничных размерах, что допустимо в соответствии с ГОСТ. Некорректное определение балла зерна происходит в случаях, когда на изображении присутствует малое количество зерен, или размеры объектов находятся на границе определенного стандартом диапазона ($G_{-3..-2}, G_{13..14}$), что приводит к невозможности идентифицировать часть из них, следовательно, уменьшается количество данных для оценки.

Таблица 1. Результаты анализа изображений базовых шкал
Table 1. Results of analysis of images of basic scales

Номер зерна (Grain size), G	Результаты анализа (Analysis results), G		
	По методу подсчета количества зерен (For the counting method)	По методу пересечения границ зерен (For method of crossing grain boundaries)	По методу измерения длин хорд (For method of changing chord lengths)
-3	—	-1	-2
-2	-2	-1	-1
-1	-1	0	-1
0	0	1	0
1	1	2	1
2	2	3	2
3	3	4	4
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	10
12	12	12	11
13	13	12	12
14	14	13	13

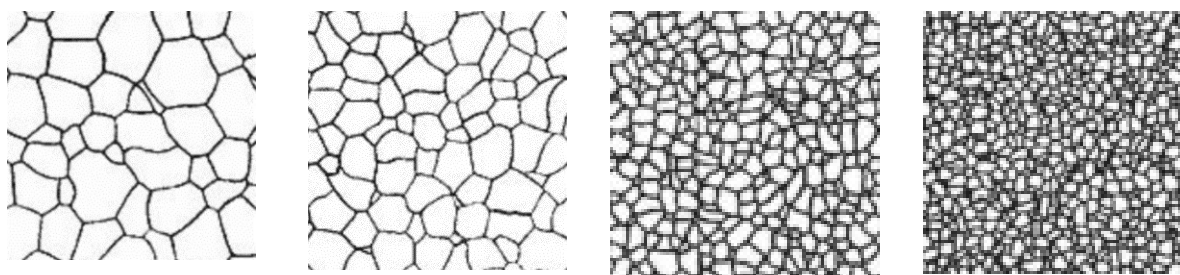


Рис. 4. Примеры тестовых изображений
Fig. 4. Test image examples

В табл. 2 представлены результаты экспериментов для реальных изображений, имеющих различные размеры и форму зерен, структуры их распределения (см. рис. 5). Каждое изображение обрабатывалось при трех различных разрешениях с шагом в 4 балла зерна. В качестве опорного метода применен визуальный анализ.

Таблица 2. Результаты анализа реальных изображений микрошлифов
Table 2. Results of analysis of real metals microstructure images

Изображение (Image)	Разрешение (Resolution), мкм/пик (µm/px)	Номера зерен по результатам анализа (Grain size based on analysis results), G			
		п. 3.3	п. 3.4	п. 3.5.3	п.3.6
рис. 5, a	1	6	6	6	6
	0,25	10	10	10	10
	0,06	14	14	13	14
рис. 5, b	3	5	5	5	5
	0,8	9	9	9	9
	0,2	13	13	12	12
рис. 5, c	3,5	4	4	4	4
	0,9	8	8	8	8
	0,2	12	12	12	12
рис. 5, d	3,5	3	3	3	3
	0,9	7	7	7	7
	0,25	11	11	11	10
рис. 5, e	8	2	2	2	2
	2	6	6	6	6
	0,5	10	10	10	10
рис. 5, f	5	1	1	1	1
	1,25	5	5	6	6
	0,35	9	9	9	9
рис. 5, g	6	0	0	1	1
	1,3	4	4	5	5
	0,3	8	8	8	8
рис. 5, h	9	-1	-2	0	-1
	2	3	2	3	4
	0,5	7	6	7	7
рис. 5, i	11	-2	-2	-2	-1
	3,5	2	2	3	2
	0,95	6	6	6	6
рис. 5, j	16	-3	-3	-3	-2
	4	1	1	1	1
	1	5	5	5	5

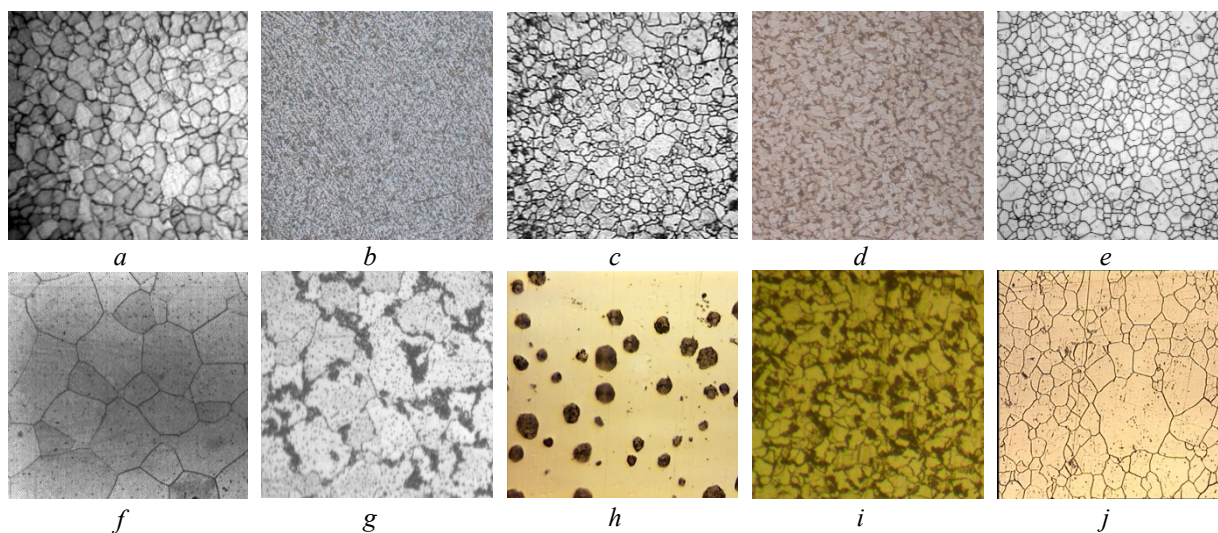


Рис. 5. Изображения для проверки методов анализа
Fig. 5. Microstructure images of metal

Анализ табл. 2 показывает, что на качество вычисления балла зерна предложенным алгоритмическим обеспечением влияет несколько факторов. Согласно стандарту, зерна металлов – это кристаллы, разделенные смежными поверхностями, т. е. толщина границы между ними принимается минимально возможной. Следовательно, при наличии свободного пространства между объектами (рис. 5, *h*) балл зерна может быть вычислен неточно методом подсчета зерен. В соответствии с методом пересечения границ зерен для анализа необходимо использовать изображение, на котором должно присутствовать не менее 50 зерен (рис. 5, *f, g, h*). Следовательно, если на изображении алгоритмом обнаружено меньшее количество зерен и присутствуют значительные шумовые области, то это приводит к дополнительной погрешности. Наличие на изображении зерен с баллом зерна $G > 11$ или $G < 0$ приводит к ошибкам при автоматической классификации, вследствие чего вычисленное значение может быть меньше и больше реального.

Сравнение результатов работы предложенного алгоритма с существующими (см. табл. 3.) на реальных изображениях подтверждает повышение точности и повторяемости результатов анализа различными методами.

Таблица 3. Сравнение алгоритмов обработки изображений для анализа
Table 3. Comparison of image processing algorithms for analysis

Алгоритм обработки (Processing algorithm)	Метод анализа (Analysis method)			Размер зерна (Grain size)	
	п. 3.3	п. 3.4	п. 3.5.3	Среднее (Mean)	Известный (Known)
Предложенный	8	8	8	8	8
Алгоритм из [5]	8	8	8	8	
Алгоритм из [3]	8	7	7	7,7	
Предложенный	7	7	7	7	7
Алгоритм из [5]	7	7	8	7,3	
Алгоритм из [3]	7	6	6	6,6	
Предложенный	5	5	5	5	5
Алгоритм из [5]	5	5	6	5,3	
Алгоритм из [3]	5	4	5	4,7	
Предложенный	3	3	3	3	3
Алгоритм из [5]	3	2	3	2,7	
Алгоритм из [3]	3	3	3	2,7	
Предложенный	1	1	2	1,3	1
Алгоритм из [5]	1	0	1	0,7	
Алгоритм из [3]	1	0	1	0,7	

Адекватность результатов определения номера зерна с использованием предложенного алгоритмического обеспечения подтверждается успешным прохождением программного обеспечения MGSoft, разработанного на его основе, межлабораторных сличений среди аккредитованных лабораторий в туре проверки квалификации BelGIM-PT-T-28-3-2020/2020 (определение величины зерна), проводимом научно-исследовательский отделом межлабораторных сличений Республиканского унитарного предприятия «Белорусский государственный институт метрологии».

Заключение

Представлено алгоритмическое обеспечение для анализа изображений микроструктуры металлов, реализующее металлографические методы: определения величины зерна сравнением с эталонными шкалами; подсчета зерен на микрошлифе, который используется только для равноосных зерен; подсчета пересечения границ зерен, свободного от данного ограничения; измерения хорд. Для обнаружения зерен на изображении используется адаптивная эквализация гистограммы с ограничением контраста на этапе предварительной обработки, затем применяется адаптивная бинаризация, дистанционное преобразование и алгоритм водораздела с последующей морфологической обработкой для фильтрации объектов, размеры которых не могут соответствовать размерам зерен. Сравнение результатов работы предложенного

алгоритма с существующими и на эталонных, и на реальных изображениях подтверждает повышение точности и повторяемости результатов анализа различными методами.

На основе представленного алгоритма разработано программное обеспечение, реализующее указанные методы анализа, которое также предоставляет возможности: калибровки для возможности получения реальных размеров зерен; предварительной обработки изображений в автоматическом или ручном режимах; сохранения результатов в виде отчета в формате jpg. Пакетная обработка предоставляет возможность загрузки последовательности изображений для обработки однотипным алгоритмом.

Список литературы

1. Анисович А.Г. Современная металлография – основа литейного материаловедения. *Литье и металлургия*. 2019;3:99-108. DOI:10.21122/1683-6065-2019-2-99-108.
2. Чичко А.Н., Сачек О.А., Лихоузов С.Г., Соболев, В.Ф., Веденеев, А.В. Алгоритм и программное обеспечение для обработки изображений микроструктур перлитных сталей. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2010;3:14–21.
3. Анисович А.Г., Румянцева И.Н., Бислюк Л.В. Определение балла зерна стали компьютерными методами. *Литье и металлургия*. 2010;3(57):100-104. DOI: 10.21122/1683-6065-2010-3-100-104.
4. Шарыбин С.И., Столбов В.Ю., Гитман М.Б., Барышников М.П. Разработка интеллектуальной системы распознавания сложных микроструктур на шлифах металлов и сплавов. *Нейрокомпьютеры, разработка, применение*. 2014;12:50-56.
5. Стародубов Д.Н. Алгоритмы предварительной обработки изображений микроструктур. *Алгоритмы, методы и системы обработки данных*. 2010;15:179-185.
6. Сивкова Т., Губарев С., Каменин И. Автоматизированный анализ микроструктуры материалов. Анализ изображений с наличием дефектов пробоподготовки. *Труды международной конференции по компьютерной графике и зрению «ГРАФИКОН2020»*. 2020; 1:15-26. DOI: 10.51130/graphicon-2020-1-15-26.
7. Чичко А.Н., Сачек О.А., Ганжа В.А., Гашникова О.П. Алгоритмы для автоматизации обработки изображений макро- и микроструктуры сплавов. *Литье и металлургия*. 2008;1(45):79-84.
8. Pizer S. M., Amburn E. P., Austin J. D., Cromartie R., Geselowitz A., Greer T., Romeny B.H., Zimmerma J. B., Zuiderveld K. Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1987;39(3):355-368.

References

1. Anisovich A.G. [Modern metallography – the basis of foundry material science]. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry production and metallurgy)*. 2019;(2):99-108. (In Russ.). DOI:10.21122/1683-6065-2019-2-99-108.
2. Сніснко А.Н., Сачек О.А., Лихоузов С.Г., Соболев В.Ф., Веденеев А.В. [Algorithm and software for processing of images of pearlitic steels microstructures]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 2010;3:14-21. (In Russ.)
3. Anisovich A.G., Romyantseva I.N., Bisluk L.V. [Determination of steel grain grade by computer methods]. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry production and metallurgy)*. 2010;(3):100-104. (In Russ.). DOI: 10.21122/1683-6065-2010-3-100-104.
4. Sharybin S.I., Stolbov V.Yu., Gitman M.B., Baryshnikov M.P. [Developing of an intellectual system of complex microstructures analysis and classification on thin metal sections]. *Neurocomputers*. 2014;12:50-56.
5. Starodubov D.N. [Algoritmy predvaritel'noy obrabotki izobrazheniy mikrostruktur]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannykh*. 2010;15:179-185. (In Russ.)
6. Sivkova T., Gubarev S., Kamenin I. [Avtomatizirovanny analiz mikrostruktury materialov. Analiz izobrazheniy s nalichiyem defektov probopodgotovki]. *Processing of International Conference on Computer Graphics and Vision "GraphiCon 2020"*. 2019;29:255-259. (In Russ.). DOI: 10.51130/graphicon-2020-1-15-26.
7. Chichko A.N., Sachek O.A., Ganzha V.A., Gashnikova O.P. [Algoritmy dlya avtomatizatsii obrabotki izobrazheniy makro- i mikrostruktury splavov]. *Lit'ye i metallurgiya*. 2008;1(45):79-84. (In Russ.)
8. Pizer S.M., Amburn E.P., Austin J.D., Cromartie R., Geselowitz A., Greer T., Romeny B.H., Zimmerma J.B., Zuiderveld K. Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1987;39(3):355-368.

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.
All authors contributed equally to the writing of the paper.

Сведения об авторах

Богущ Р.П., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета.

Адамовский Е.Р., аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета.

Денисенко С.Ф. начальник испытательно-исследовательского центра Полоцкого государственного университета.

Information about the authors

Bohush R.P, PhD, Associate professor, Head of Computer Systems and Networks Department of Polotsk State University.

Adamousky Y.R, Postgraduate student of Computer Systems and Networks Department of Polotsk State University.

Denisenak S.F., Head of Test and Research Center of Polotsk State University.

Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь,
Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29,
Полоцкий государственный университет;
тел. +375-214-42-30-31;
e-mail: r.bogush@psu.by
Богущ Рихард Петрович

Address for correspondence

211440, Republic of Belarus,
Vitebsk region, Novopolotsk, Blokhina str., 29,
Polotsk State University;
tel. +375-214-42-30-31;
e-mail: r.bogush@psu.by
Bohush Rykhard Petrovich