

АНАЛИЗ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ

Королев Д. В., Суворов К. А.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), pyrotechnics@narod.ru

В микроскопическом анализе начальным этапом является визуальное изучение частиц порошка, пор материала, либо различных дефектов шлифа. В процессе изучения измеряются линейные размеры объектов исследования. Данная операция довольно трудоемка. Автоматизация процесса возможна с помощью применения компьютерных технологий. При этом встает вопрос о выборе методов обработки получаемых изображений и их программной реализации.

Цель данной работы заключалась в разработке методики, предназначенной для автоматизации микроскопического анализа распределения частиц порошков, пор и дефектов структуры материалов по размерам с помощью компьютерной обработки изображений.

В [1] предложена следующая последовательность обработки и распознавания изображений:

Фильтрация изображения.

Минимизация визуальной информации (исключение точек фона, а также точек, находящихся внутри односвязных контуров).

Препарирование изображения (разбиение многосвязных контуров на односвязные).

Распознавание объектов изображения.

Обработка информации об объектах.

При решении поставленной задачи этот алгоритм можно упростить, приняв следующие допущения:

- большинство измеряемых объектов имеет форму без поднутрений;
- измеряемые объекты не касаются и не перекрывают друг друга.

С учетом принятых допущений и специфики исходных изображений предлагается использовать следующую последовательность обработки:

Фильтрация (контрастирование) изображения.

Преобразование исходного изображения в бинарное (черно-белое).

Обработка краев изображения (удаление объектов не попавших целиком в поле зрения).

Распознавание объектов изображения.

После операции распознавания изображения производится статистическая обработка полученных данных о размерах объектов.

Известны различные методы фильтрации изображений, начиная с простых линейных фильтров и заканчивая сложными фрактальными фильтрами [1—6]. В каждом конкретном случае подбираются методы фильтрации, подходящие для решения практической задачи.

Изображение, являющееся исходным для операции распознавания, должно иметь четкие границы объектов и не содержать мелкого «мусора» (отдельных точек связанных с дефектами оптики, попаданием пыли и т. д.). Для этого проводится контрастирование, то есть выделение перепадов яркости изображения. Эта операция мо-

жет быть выполнена различными методами: методом Робертса, методом Собела, методом выявления локальных максимумов [6] и т. д.

Для контрастирования исходного изображения предлагается использовать метод медианной фильтрации [2, 5, 6]. Сущность его состоит в следующем. Окно заданного размера перемещается по изображению построчно. Все точки, попавшие в окно на каждом шаге (рис. 1, *а*), записываются в одномерный массив (рис. 1, *б*). Элементы массива сортируются по возрастанию яркости (рис. 1, *в*). Находится центральный элемент массива (медиана). Значению яркости точки формируемого изображения с координатами, соответствующими центру окна на исходном изображении, присваивается значение яркости центрального элемента отсортированного массива.

1	2	3
4	5	6
7	8	9

а

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

б

3	5	6	9	2	4	8	1	7
---	---	---	---	---	---	---	---	---

в

Рис. 1. Алгоритм медианной фильтрации: *а* — окно 3×3 с элементами изображения; *б* — одномерный массив с элементами окна; *в* — отсортированный массив

Методы преобразования изображений из многоцветных в бинарные базируются либо на вычислении градиентов яркости, либо на простом разделении по задаваемому порогу яркости. Для преобразования изображения в бинарное предлагается использовать следующий алгоритм. Задается определенный пороговый уровень яркости. Изображение сканируется построчно, причем, если значение уровня яркости текущей точки выше порогового уровня, то в формируемое изображение записывается точка черного цвета, в противном случае записывается точка белого цвета. Данный метод преобразования работает довольно быстро, так как не требует дополнительных вычислений.

Объекты изображения (частицы порошков) не нуждаются в идентификации (необходимо лишь определить их линейные размеры). Поэтому для поиска и измерения частиц можно воспользоваться алгоритмом прослеживания контуров [5]. Алгоритм работает следующим образом. Исходное изображение просматривается построчно до тех пор, пока не встретится элемент объекта. Затем начинается прослеживание контура (рис. 2). Если текущая точка является элементом объекта, то направление передвижения меняется на 90° влево. Если точка принадлежит фону, то направление меняется на 90° вправо. Прослеживание контура прекращается при попадании в исходную точку. На каждом шаге координаты записываются в массив. По координатам точек контура определяется наибольший горизонтальный размер объекта. Объект вырезается из изображения для исключения повторной обработки. Просмотр изображения возобновляется.

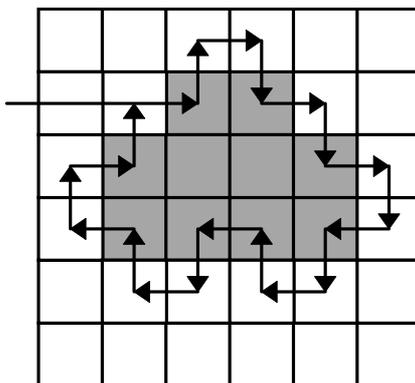


Рис. 2. Алгоритм прослеживания контуров

Обработка краев изображения производится с целью удаления частиц, не попавших целиком в поле зрения. Она осуществляется путем последовательного просмотра точек, прилегающих к границам изображения. При нахождении точки черного цвета ее контур просматривается по приведенному выше алгоритму и затем объект удаляется с изображения путем закрашивания цветом фона (белым).

Переход от точек изображения к реальным единицам измерения (микрометрам) производится следующим образом. Измеряется размер шкалы (в точках) на предварительно отснятом изображении объект-микрометра марки ОМ-Д17.216.009 или подобного. Эта величина, деленная на размер шкалы в реальных единицах, дает коэффициент пересчета точек изображения в микрометры.

Пример предварительной обработки изображения порошка показан на рис. 3.

Для достоверности получаемых результатов необходимо располагать выборкой из 300 — 500 частиц [7]. Измерения рекомендуется производить при двух и более различных увеличениях [9], что обеспечивает большую достоверность подсчета количества малых и крупных объектов. Исходя из этого, при автоматическом анализе нужно произвести обработку 10—20 кадров изображений с последовательным накоплением данных.

При проведении микроскопического анализа получают выборку объектов с различными размерами. Для удобства хранения и обработки информации обычно ее представляют функциональной зависимостью с несколькими параметрами. Как правило, при этом используются нормальный и логарифмически нормальный законы распределения (ЛНЗР) [8]. Однако указанные законы распределения не всегда адекватно описывают распределение объектов по размерам. Поэтому, в частности, для описания дисперсного состава порошков и пылей рекомендуется [9,10] использовать не только ЛНЗР, но и формулы (табл. 1) распределения Розина-Раммлера (РР) или Годена-Андреева-Шумана (ГАС).

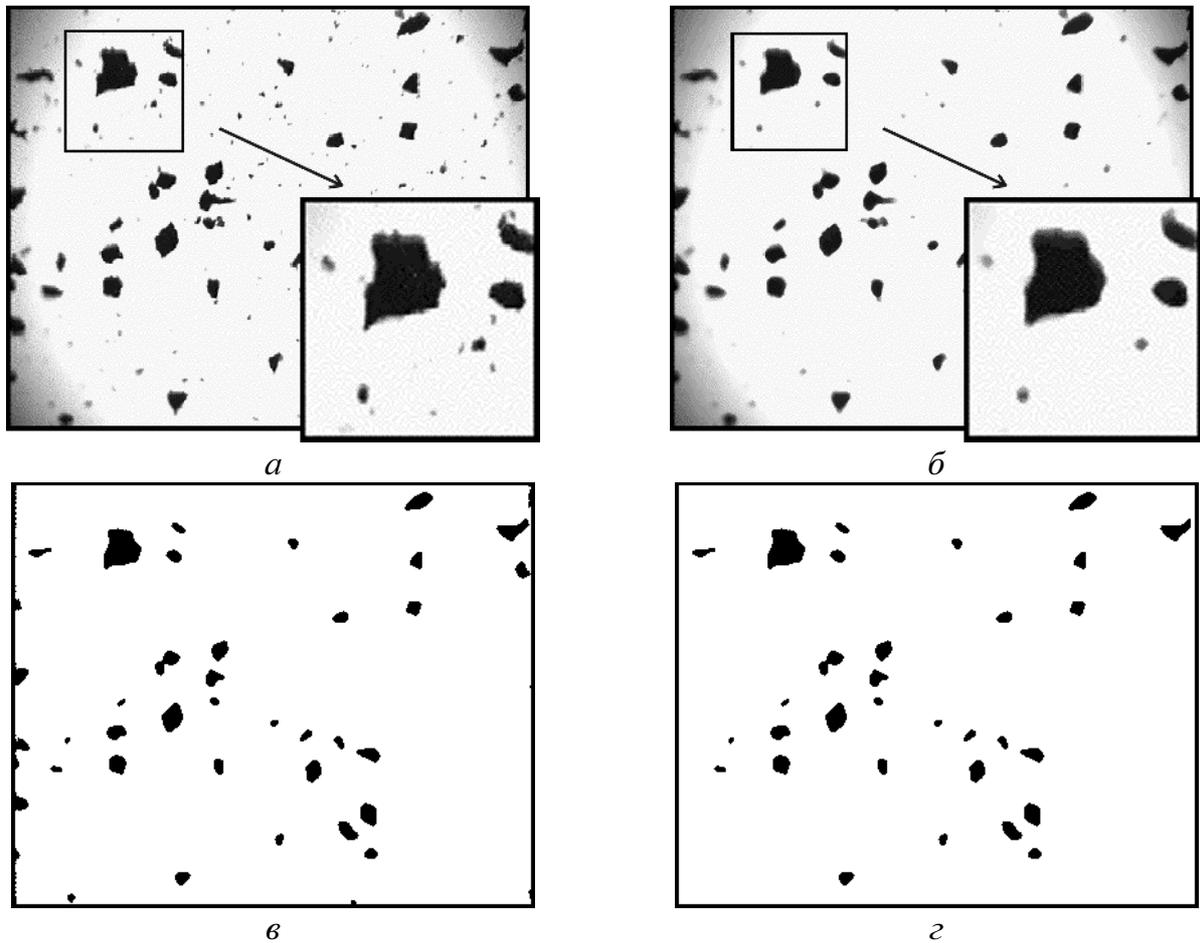


Рис. 3. Изображение на экране дисплея порошка марки ПАМ-4: *а* — исходное изображение; *б* — изображение после медианной фильтрации окном 5×5; *в* — изображение, преобразованное в черно-белое; *г* — изображение после обработки краев

Таблица 1

Формулы для описания распределения объектов по размерам [9]

Распределение	Формула дифференциальной кривой распределения	Параметры распределения
ЛНЗР	$\varphi(\delta) = \frac{\ln(e)}{\sqrt{2\pi\delta} \ln(\sigma)} \exp\left[-\frac{(\ln(\delta) - \ln(\delta_{50}))^2}{2\ln^2(\sigma)}\right]$	$\ln\delta_{50}, \ln\sigma$
ГАШ	$\varphi(\delta) = \left(\frac{0.8l}{\delta_{80}}\right) \delta^{l-1}$	δ_{80}, l
РР	$\varphi(\delta) = b a \delta^{a-1} \exp(-b \delta^a)$	a, b

Примечание: $\varphi(\delta)$ — значение дифференциальной кривой распределения объектов по размерам; δ — размер объектов

Таким образом при анализе дисперсного состава порошков необходимо вначале определить вид функции распределения и только потом — параметры
 Королев Д. В., Суворов К. А. Анализ дисперсного состава микроскопических объектов с использованием ЭВМ//
 Сборник трудов международной конференции «Математические методы в технике и технологиях— ММТТ-19», 30 мая—1 июня 2006, Воронеж.— 6 с.

распределения. На практике вид функции распределения определяют с помощью специальных координатных сеток [9], на которые наносят экспериментальные данные. Считается [9,10], что наиболее хорошо фракционный состав порошка описывает тот закон, на координатной сетке которого график дисперсного состава наиболее близок к прямой линии. Очевидно, что данный метод достаточно субъективен. Поэтому предлагается выбор функции распределения осуществлять по минимуму суммы квадратов невязки экспериментальной и расчетной интегральных кривых.

При использовании двухпараметрических формул для описания выборки возникают проблемы в сопоставлении параметров распределений объектов, описываемых различными зависимостями.

Известна трехпараметрическая формула Свенсона-Авдеева [9], которая имеет универсальный характер и позволяет избежать упомянутых трудностей

$$\varphi(\delta) = B \exp(-b \delta^p) \delta^{a-1}, \quad (1)$$

где a, b, p — параметры распределения; B не является параметром, а находится из условия

$$\int_0^{\infty} \varphi(\delta) d\delta = 1. \quad (2)$$

Данную функцию можно рассматривать как обобщение большинства известных эмпирических и теоретических законов статистического распределения случайных величин. При определенных значениях параметров b, p и a могут быть получены различные эмпирические уравнения статистического распределения случайной величины. При $a=p$ из уравнения (1) получается функция распределения Розина-Раммлера; при $b=0$ или $p=0$ — уравнение Годена-Андреева-Шумана.

Таблица 2

Параметры распределения частиц порошков по размерам

Порошок	ЛНЗР		PPP			Распределение Свенсона-Авдеева				
	параметры		δ_{cp}	параметры		δ_{cp}	параметры			δ_{cp}
	$\ln \delta_{50}$	$\ln \sigma$		a	b		a	b	p	
Al ₂ O ₃	2,51	0,36	12,3	2,70	15,7	13,7	4,80	0,17	1,20	12,7
SiO ₂	3,91	0,63	50,1	1,44	70,5	54,70	3,60	0,50	0,60	55,0
МПФ-2	5,56	0,45	261	2,85	361,0	317,0	7,23	0,15	0,73	301,5
МПФ-4	4,60	0,55	99,3	1,93	141,0	117,0	5,34	0,19	0,74	127,7
ПАМ-2	5,82	0,29	337,0	3,33	400,0	358,0	5,72	0,50	0,52	332,1
ПАМ-4	4,40	0,35	81,4	3,25	104,0	92,7	6,57	0,10	0,96	77,7

Примечание: δ_{cp} — среднеарифметический диаметр частиц порошка, мкм

Параметры уравнения (1) не могут быть вычислены аналитически. Это ограничивало ранее практическое применение формулы Свенсона-Авдеева. С появлением мощных вычислительных машин появилась возможность расчета параметров численными методами с достаточной точностью.

Изложенная выше методика обработки изображений была использована для анализа дисперсного состава различных порошков. Статистическая обработка выборок производилась при помощи четырех указанных выше уравнений. На основании результатов статистической обработки для описания дисперсного состава порошков МПФ-2 и МПФ-4 выбран ЛНЗР, для остальных порошков — РРР. Для всех порошков в табл. 2 приведены параметры распределения по формуле Свенсона-Авдеева.

Таким образом, предложен алгоритм обработки изображений порошков и осуществлена программная реализация численного поиска коэффициентов уравнения Свенсона-Авдеева, позволяющая находить число и размеры объектов при микроскопическом анализе. Разработанная методика позволяет автоматизировать анализ распределения по размерам порошкообразных частиц, кристаллов, пор и дефектов различных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений. — М.: Высш. шк., 1983.
2. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Сов. радио, 1979.
3. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1986.
4. Фурман Я. А., Юрьев А. Н., Яншин В. В. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. — Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1992.
5. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен: Пер. с англ. — М.: Мир, 1976.
6. Яншин В. В., Калинин Г. А. Обработка изображений на языке Си для IBM PC: Алгоритмы и программы. — М.: Мир, 1994.
7. Бурштейн А. И. Методы исследования запыленности и задымленности воздуха. — Киев: Госмедиздат, 1954.
8. Система Видеотест. Руководство пользователя. — Л.: Иста-Видеотест, 1990.
9. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. — Л.: Химия, 1987.
10. Коузов П. А., Скрябина Л. Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. — Л.: Химия, 1983.