

**РАСШИРЕННЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧАСТИЦ ПОРОШКА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАГИНА EXTENDED PARTICLE ANALYZER
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА IMAGEJ.
СООБЩЕНИЕ 1. ПОДГОТОВКА ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ К АНАЛИЗУ**

В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, В. В. Остриков

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
пр-т Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь,
тел.: +375 17 267 12 54, e-mail: lerakor1974@mail.ru*

Поступила 02.06.2025 г.

Разработана методика подготовки цифрового изображения для количественного морфологического анализа частиц порошка с использованием программного комплекса ImageJ. Методика включает три основных стадии: получение цифрового изображения, его предварительную обработку и сегментацию. В работе приведена методика подготовки цифрового изображения распыленного порошка алюминия для дальнейшего анализа количества, размеров и формы частиц с использованием плагина Extended Particle Analyzer.

Введение. К современным технологиям производства порошков предъявляют высокие требования относительно точности анализа их морфологических характеристик, таких как распределение частиц по размерам и их форма. Эти параметры напрямую влияют на технологические свойства порошков и в конечном итоге на эксплуатационные свойства изделий из них. В связи с этим возрастает необходимость в создании эффективных методик количественного морфологического анализа, позволяющих автоматизировать и повысить точность исследований.

Современные исследования морфологии порошков базируются на обработке их цифровых изображений, полученных методом сканирующей электронной микроскопии, при помощи различных программных инструментов. Одним из таких инструментов является программный комплекс *ImageJ* [1], находящийся в открытом доступе и характеризующийся простотой использования и отсутствием необходимости программирования. *ImageJ* разработан специально для научной обработки изображений с целью решения задач, связанных с качественным и количественным анализом: подсчет размеров объектов и их количества, определение формы и анализ текстур, измерение цвета и др. Так, эту программу используют для анализа размеров и формы частиц россыпного золота [2], для определения разме-

ров частиц полиэфирного порошка и волокон вискозы [3], для оценки формы и размеров опасных полимерных частиц, загрязняющих окружающую среду [4, 5], для оценки распределения частиц гравия по размерам [6], для определения размеров частиц порошка мартенситностареющей стали MS1, используемой при лазерном спекании изделий со сложной геометрией в аддитивном производстве [7], при анализе изображений, полученных методами лазерной дифракции, сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской компьютерной томографии высокого разрешения, для оценки размеров сферических порошков из нержавеющей стали 316L [8], для определения размеров, количества и формы продуктов износа ДВС, присутствующих в моторном масле [9], и др. Анализ частиц в приведенных примерах использования *ImageJ* осуществлялся при помощи встроенного в программу инструмента *Analyze Particles*, который позволяет задавать и определять ограниченное количество параметров анализа (площадь частицы и параметр формы *Circularity*), не поддерживает построение графиков и гистограмм и не может использоваться для пакетного анализа изображений.

Одним из преимуществ программного комплекса *ImageJ* является возможность использования более тысячи плагинов, которые расширяют функциональность программы для решения

различного рода технических задач. Для анализа частиц разработаны такие плагины, как *ParticleSizer*, *ND (Nearest Distances)*, *Extended Particle Analyzer*, *Custom Particle Analyzer* и др. [10]. Среди перечисленных плагинов наибольший интерес для анализа частиц порошка представляет *Extended Particle Analyzer* (расширенный анализатор частиц), который расширяет возможности встроенного инструмента *Analyze Particles* и позволяет использовать дополнительные параметры и гибкие настройки для более детального анализа формы, размера и ориентации частиц.

Целью работы является разработка методики исследования морфологии частиц порошка с использованием плагина *Extended Particle Analyzer* программного комплекса *ImageJ*.

Целью настоящего сообщения является разработка методики подготовки цифрового изображения для исследования морфологии частиц порошка с использованием *ImageJ*.

Методика исследования. Разрабатываемая методика подготовки цифрового изображения для анализа частиц порошка будет основана на предлагаемом алгоритме, включающем три основные стадии: получение изображения, его предварительную обработку и сегментацию. Анализ частиц с использованием плагина *Extended Particle Analyzer* (стадия IV) представлен в сообщении 2.

Стадия I. Получение изображения. Для получения изображений, которые можно обрабатывать в программе *ImageJ*, можно использовать различные устройства, такие как оптические, электронные (сканирующие и просвечивающие) и конфокальные микроскопы, цифровые камеры и камеры микроскопии, планшетные и специализированные (например, слайд-сканеры) сканеры. *ImageJ* поддерживает множество форматов

изображений, включая *TIFF*, *JPEG*, *PNG*, *BMP*, *GIF* и др. Однако для анализа рекомендуется [10] использовать формат *TIFF*, чтобы сохранить качество изображения, при этом его разрешение должно быть не менее 1024×768 пикселей.

В качестве примера определения размеров, количества и формы частиц нами выбрано оригинальное цифровое изображение распыленного порошка алюминия с размерами частиц 74–150 мкм (рис. 1) [11], полученного на сканирующем электронном микроскопе в формате *TIFF* с разрешением 1620×1215 .

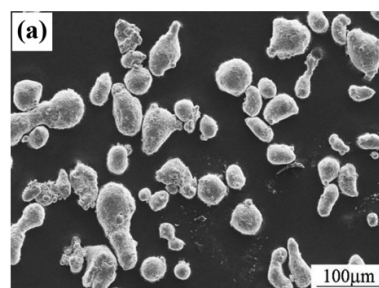


Рис. 1. Оригинальное цифровое изображение порошка алюминия

Стадия II. Предварительная обработка изображения. Эта стадия состоит из трех этапов: введения изображения в программу *ImageJ*, создания его копии, перевода в формат *8-bit*; калибровки (масштабирования); коррекции контрастности/яркости и использования различных фильтров для улучшения изображения.

Этап 2.1. Введение изображения в программу *ImageJ*, создание его копии и перевод в формат *8-bit*. Для проведения анализа открываем оригинальное изображение в программе *ImageJ* (*File* → *Open* → файл «порошок_Al.tif») и делаем его копию (*Image* → *Duplicate*) «порошок_

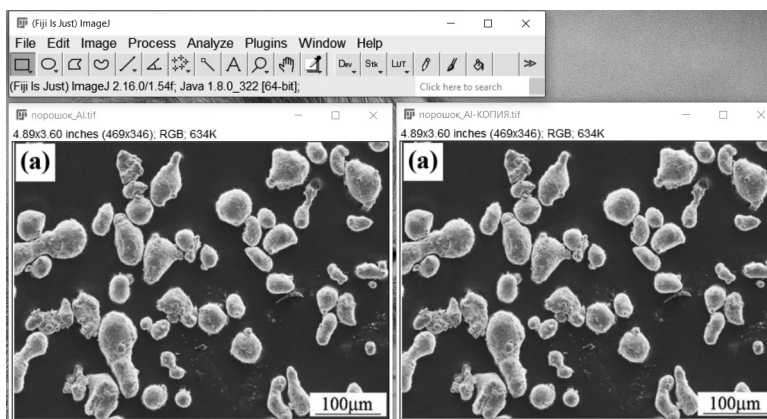


Рис. 2. Введение изображения в программу и создание его копии

AI-КОПИЯ.tif», необходимую для ее сравнения с изображениями, преобразуемыми в процессе исследования (рис. 2).

Далее осуществляем перевод изображения в формат 8-bit (*Image* → *Type* → 8-bit) (рис. 3).

Этап 2.2. Калибровка (масштабирование) изображения. Для калибровки изображения, т. е. перевода измерений в пиксельных значениях в значения единиц длины, осуществляем следующие действия: на панели инструментов нажимаем кнопку «Straight» и проводим линию на масштабной метке, в строке меню выбираем последовательность команд *Analyze* → *Set Scale* и в открывшемся окне устанавливаем *Known distance* – 100, *Unit of length* – μm (мкм) (рис. 4). Далее, после нажатия кнопки «OK», все значения измерений величин геометрических объектов будут выражаться в мкм.

Этап 2.3. Коррекция контрастности/яркости и удаление шума. Для коррекции контрастности и яркости изображения выбираем команды из строки меню *Image* → *Adjust* → *Brightness/Contrast* и, используя соответствующие ползун-

ки, настраиваем изображение для наилучшего отделения частиц от фона (рис. 5).

Улучшение изображения (удаление шума) осуществляем за счет применения фильтров путем выбора команд из строки меню *Process* → *Filters* → выбранный фильтр, например *Median* или *Gaussian Blur*. Из-за отсутствия необходимости при анализе данного изображения эта операция не проводилась.

Стадия III. Сегментация изображения.

Данная стадия включает в себя три этапа: преобразование изображения в бинарное, разделение соприкасающихся частиц и ручную корректировку изображения.

Этап 3.1. Преобразование изображения в бинарное (рис. 6). Для этого выполняем следующую последовательность операций: в строке меню выбираем команды *Image* → *Adjust* → *Threshold* и в открывшемся окне отмечаем режим *Dark Background* (темный фон) и цвет частиц – *Red* (красный), верхним ползунком настраиваем изображение частиц, которое, с нашей точки зрения, соответствует изображению частиц в оригинальном изображении (рис. 6, а). Далее на-

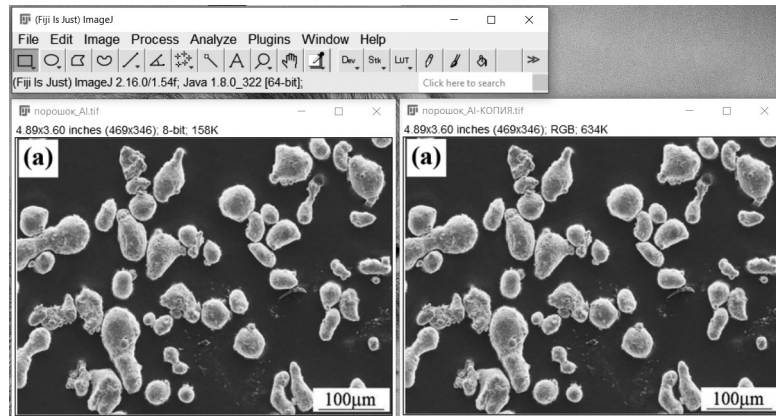


Рис. 3. Перевод цифрового изображения в формат 8-bit

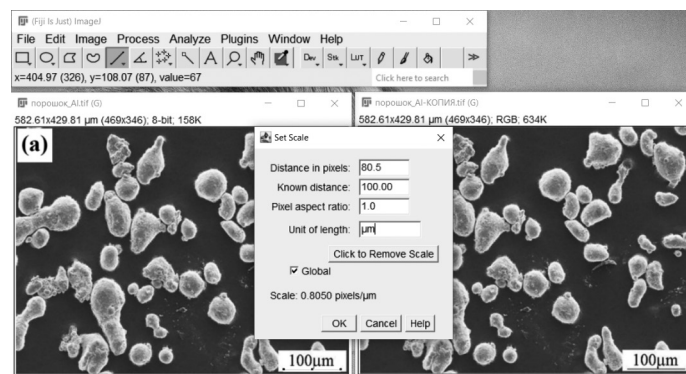


Рис. 4. Калибровка (масштабирование) цифрового изображения

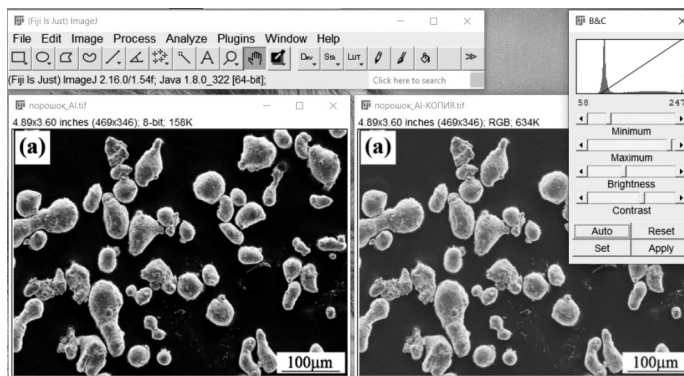


Рис. 5. Коррекция контрастности и яркости изображения

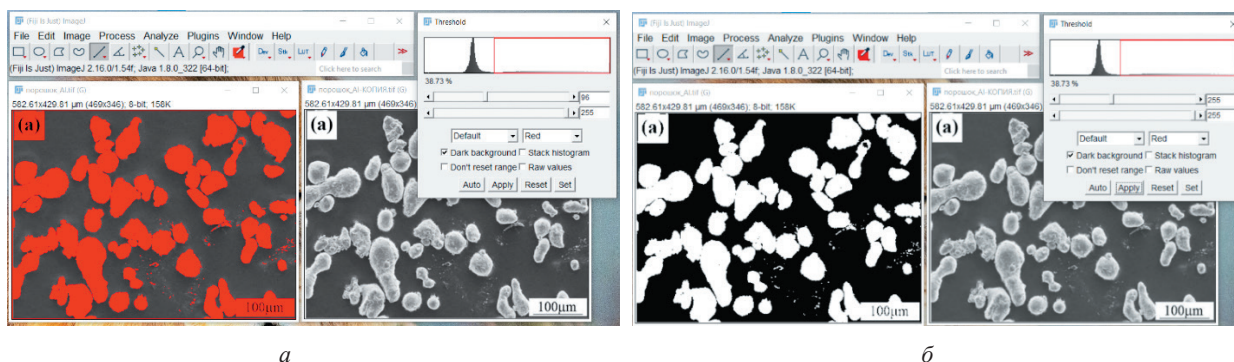


Рис. 6. Преобразование изображения в бинарное: а – красные частицы на темном фоне; б – черно-белое

жатием кнопки «Apply» переводим исследуемое изображение в бинарное черно-белое (рис. 6, б).

Этап 3.2. Разделение соприкасающихся частиц. Эта операция осуществляется автоматически путем выбора следующей последовательности команд *Process* → *Binary* → *Watershed* (рис. 7).

Этап 3.3. Ручная корректировка изображения. На этом этапе вручную производим корректировку полученного изображения (добавлени-

ем или удалением фрагментов), используя кнопки на панели инструментов «*Paintbrush Tool*» (кисть) или «*Pencil Tool*» (карандаш) с выбором белого и черного цвета с применением «*Color picker*» (палитра цветов). Повторением команд *Image* → *Adjust* → *Threshold* получаем отредактированное изображение в виде красных частиц на черном фоне (рис. 8).

Таким образом, полученное окончательное изображение (рис. 8) может быть использовано для

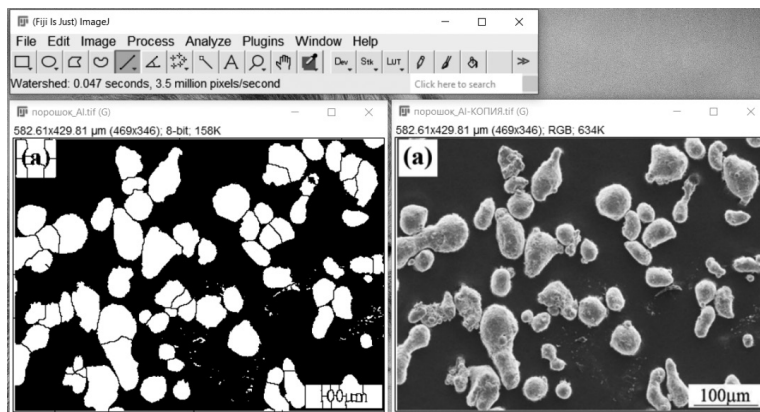


Рис. 7. Разделение соприкасающихся частиц

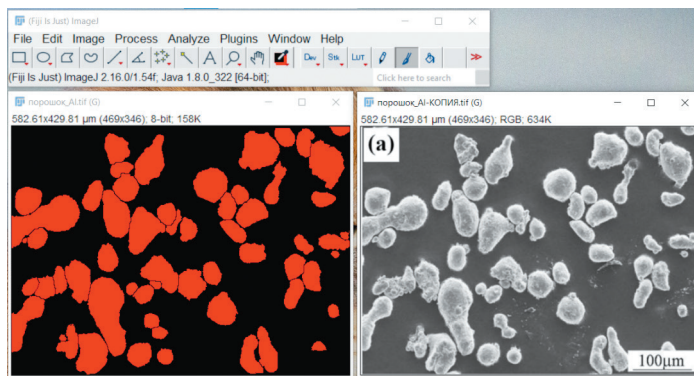


Рис. 8. Окончательное изображение, готовое для анализа

дальнейшего углубленного морфологического анализа частиц порошка с использованием плагина *Extended Particle Analyzer* программы *ImageJ*.

Заключение. В работе показаны широкие возможности использования программного комплекса *ImageJ* для решения ряда технических задач, связанных с качественным и количественным анализом цифровых данных, в частности для определения количества, размеров и формы

частиц. Показано, что данная программа может быть использована для анализа порошков по их цифровым изображениям.

На примере распыленного порошка алюминия приведена методика подготовки цифрового изображения с использованием программного комплекса *ImageJ* для дальнейшего анализа количества, размеров и формы частиц с использованием плагина *Extended Particle Analyzer*.

Литература

1. **Ferreira, T.** ImageJ user guide / Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband // ImageJ wiki. – URL: <https://imagej.net/ij/docs/guide/> (date of access: 05.05.2025).
2. **Crawford, E. C.** An ImageJ plugin for the rapid morphological characterization of separated particles and an initial application to placer gold analysis / E. C. Crawford, J. K. Mortensen // *Computers & Geosciences*. – 2009. – № 35. – P. 347–359.
3. **Pico, D.** Image Analysis for Simultaneous Determination of Spherical and Fibrous Particles / D. Pico, A. Bartl // *Chemical Engineering Transaction*. – 2011. – Vol. 24. – P. 619–624.
4. **Image processing tools in the study of environmental contamination by microplastics: reliability and perspectives** / T. Valente, D. Ventura, M. Matiddi [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – № 30. – P. 298–309.
5. **Quantification of microplastics by count, size and morphology in beverage containers using Nile Red and ImageJ** / S. Chen, Y. Li, C. Mawhorter, S. Legoski // *Journal of Water and Health*. – 2021. – № 19.1. – P. 79–88.
6. **Kumara, J.** Image Analysis Techniques on Evaluation of Particle Size Distribution of Gravel / J. Kumara, K. Hayano, K. Ogiwara // *International Journal of GEOMAT*. – 2021. – № 3 (1). – P. 290–297.
7. **Opatová, K.** Relationship between the Size and Inner Structure of Particles of Virgin and Re-Used MS1 Maraging Steel Powder for Additive Manufacturing / K. Opatová, I. Zetková, L. Kucerová // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – Art. 956. – DOI: 10.3390/ma13040956.
8. **Factors affecting particle characterization of powders used in additive manufacturing** / D. C. Del Rio, D. J. Jensen, N. S. Tiedje [et al.] // *Powder Technology*. – 2024. – Vol. 434. – Art. 119324.
9. **Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса ImageJ. Часть 3. Метод оценки размеров, количества и формы частиц** / В. К. Корнеева, В. М. Капцевич, А. И. Цымбалюк, А. В. Макаревич // *Агропанорама*. – 2025. – № 2. – С. 32–37.
10. **The ImageJ Ecosystem: An Open Platform for Biomedical Image Analysis** / J. Schindelin, C. T. Rueden, M. C. Hiner, K. W. Eliceiri // *Molecular Reproduction & Development*. – 2015. – Vol. 82. – P. 518–529.
11. **Xu, D.** Microstructure and corrosion resistance of $Al_3(Zr, Ti)/Al$ composite prepared by powder metallurgy / D. Xu, W. Long, X. Zhou // *Advanced Composites Letters*. – 2020. – Vol. 29. – P. 1–9.

EXTENDED MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF POWDER PARTICLES USING THE EXTENDED PARTICLE ANALYZER PLUGIN OF THE IMAGEJ SOFTWARE PACKAGE. MESSAGE 1. PREPARING A DIGITAL IMAGE FOR ANALYSIS

V. M. Kaptsevich, V. K. Korneeva, V. V. Ostrikov

Belarusian State Agrarian Technical University, Independence Ave., 99, 220023, Minsk, Belarus,
tel.: +375 17 272 12 54, e-mail: lerakor1974@mail.ru

A method for preparing a digital image for quantitative morphological analysis of powder particles using the *ImageJ* software package has been developed. The method includes three main stages: obtaining a digital image, its preliminary processing and segmentation. A method for preparing a digital image of sprayed aluminum powder for further analysis of the number, size and shape of particles using the *Extended Particle Analyzer* plugin is given.