

## РАСШИРЕННЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧАСТИЦ ПОРОШКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАГИНА EXTENDED PARTICLE ANALYZER ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА IMAGEJ. СООБЩЕНИЕ 2. АНАЛИЗ ЧАСТИЦ ПОРОШКА

**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 морфологического анализа частиц порошка на основе плагина Extended Particle Analyzer программного комплекса ImageJ. Методика состоит из двух этапов: определения характеристик частиц с использованием плагина Extended Particle Analyze и статистической и корреляционной обработки результатов измерений. В качестве примера проанализированы морфологические характеристики частиц порошка алюминия, полученного методом распыления. Проведен статистический и корреляционный анализ полученных данных, выявлены взаимосвязи между геометрическими параметрами, определены основные характеристики, влияющие на форму и размер частиц. Представленная методика позволяет проводить более детальный и гибкий анализ частиц по сравнению со встроенными инструментами ImageJ, а также автоматизировать обработку изображений и повысить точность исследований в области порошковой металлургии и материаловедения.*

**Введение.** В сообщении 1 на примере распыленного порошка алюминия разработана методика подготовки цифрового изображения для исследования морфологии частиц с использованием программного комплекса ImageJ [1], а для дальнейшего анализа характеристик порошка предложено использование плагина *Extended Particle Analyze*.

Плагин *Extended Particle Analyzer* представляет собой расширенный инструмент для комплексного анализа частиц порошка, обладающий рядом ключевых преимуществ по сравнению с традиционными методами и плагинами, такими как *ParticleSizer*, *ND (Nearest Distances)* и *Custom Particle Analyzer* [2]: обеспечивает расширенный и более точный набор морфологических характеристик частиц, включая показатели формы и структуры, позволяет проводить комплексный анализ пространственного распределения частиц, включая кластеризацию и взаимное расположение, что значительно превосходит возможности узкоспециализированных плагинов, например *ND*, оптимизирован для работы с широким диапазоном размеров

и типов порошков, а также обладает средствами визуализации и автоматизации пакетной обработки больших объемов данных, что позволяет интегрировать результаты анализа для последующих исследований.

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

Целью настоящего сообщения является проведение морфологического анализа частиц порошка с использованием плагина *Extended Particle Analyze* с последующей статистической и корреляционной обработкой результатов.

**Методика исследования.** Методика исследования заключается в проведении заключительной IV стадии – анализ частиц (см. сообщение 1) и состоит из двух этапов: определения характеристик частиц с использованием плагина *Extended Particle Analyze* и статистической и корреляционной обработки результатов измерений.

### **Стадия IV. Анализ частиц.**

**Этап 4.1. Определение характеристик частиц с использованием плагина *Extended Particle***

*Analyze*. Для непосредственного анализа количества, размеров и формы частиц воспользуемся плагином *Extended Particle Analyze (Plugins → BioVoxel → Extended Particle Analyze)*.

В окне плагина устанавливаются определенные режимы для проведения исследования и задаются диапазоны значений анализируемых морфологических характеристик частиц.

Опции *Pixel units* (пиксельные единицы) и *Output in pixels* (вывод в пикселях) задают размерность измеряемых морфологических параметров частиц. При выборе (отметка галочкой)

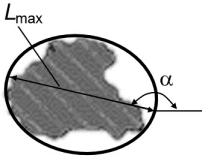

этих опций все измерения (площадь, периметр и т. д.) будут отображаться в пикселях.

Далее задаются диапазоны значений морфологических величин, характеризующих анализируемые частицы на изображении (табл. 1). Выбор этих диапазонов значений позволяет определять морфологические величины и проводить анализ частиц с конкретными выбранными параметрами. Если параметры, характеризующие частицы, не попадают в заданные диапазоны, частицы исключаются из результатов анализа.

Таблица 1. Морфологические характеристики частиц, задаваемые для анализа

Параметр	Диапазон	Схематическое изображение	Обозначение, формула
<i>Area</i> ( $\mu\text{m}^2$ ) (площадь частицы (мкм <sup>2</sup> ))	0–infinity		$S_{\text{ч}}$ – площадь частицы
<i>Perimeter</i> ( $\mu\text{m}$ ) (периметр (мкм))	0–infinity		$P_{\text{ч}}$ – периметр частицы
<i>Max Feret</i> и <i>Min Feret</i> (максимальный Фере и минимальный Фере)	0–infinity		$F_{\text{max}}$ и $F_{\text{min}}$ – максимальный и минимальный диаметры Фере
<i>Circularity</i> (круглость)	0–1,0	–	$C = 4\pi S_{\text{ч}} / P_{\text{ч}}^2$
<i>Extent</i> (степень заполнения)	0–1,0		$E = S_{\text{ч}} / S_{\text{п}}$ , $S_{\text{п}}$ – площадь прямоугольника, описывающего контуры частицы
<i>Roundness</i> (округлость)	0–1,0		$R = S_{\text{ч}} / S_{\text{к}}$ , $S_{\text{к}}$ – площадь наименьшей описывающей окружности
<i>Solidity</i> (сплошность)	0–1,0		$S = S_{\text{ч}} / S_{\text{об}}$ , $S_{\text{об}}$ – площадь описывающей выпуклой оболочки
<i>Compactness</i> (компактность)	0–1,0		$K = P_{\text{к}} / P_{\text{ч}}$ , $P_{\text{к}}$ – периметр круга, площадь которого соответствует площади частицы
<i>Feret AR</i> (соотношение Фере)	1–infinity	–	$AR_F = F_{\text{max}} / F_{\text{min}}$
<i>Aspect ratio (AR)</i> (соотношение сторон)	1–infinity		$AR = L_{\text{max}} / L_{\text{min}}$ , $L_{\text{max}}$ и $L_{\text{min}}$ – длина главной и малой оси описывающего эллипса

Окончание табл. 1

Параметр	Диапазон	Схематическое изображение	Обозначение, формула
<i>Ellipsoid angle (degree)</i> (угол эллипсоида (град.))	0–180		$\alpha$ – угол наклона $L_{max}$
<i>Feret Angle (degree)</i> (угол Фере (град.))	0–180		$\alpha_F$ – угол наклона $F_{max}$
<i>Coefficient of Variation</i> (коэффициент вариации)	0–1,0	–	$CV = \sigma/\mu$ , $\sigma$ – стандартное отклонение; $\mu$ – среднее значение

Проведем анализ морфологических характеристик всех частиц, для чего в окне плагина не ограничиваем диапазоны значений размеров и формы.

Для вывода результатов анализа частиц фиксируем следующие опции. Выбираем режим *Outlines* в опции *Show*, чтобы получить изображение контура частиц с номерами в отдельном окне. Отмечаем опции *Display results* и *Summarize*, позволяющие вывести на экран в виде отдельных окон таблицу с результатами анализа для каждой частицы и сводную таблицу с общими статистическими данными для всех параметров соответственно. Включаем опции *Exclude edges* для исключения частиц, обрезанных краями изображения, и *Include holes* для учета при-

сутствия отверстий и трещин на частице при расчете ее площади и других параметров.

После нажатия кнопки «*Ok*» получаем результаты анализа частиц в виде трех отдельных окон: *Summary* – таблица средних значений анализируемых морфологических характеристик частиц; *Drawing of Mask* – изображение контуров частиц с номерами; *Results* – таблица значений анализируемых морфологических характеристик каждой частицы (рис. 1).

*Этап 4.2. Статистическая и корреляционная обработка результатов измерений.* В таблице (окно *Results*, рис. 1) получены результаты измерений размеров, формы и ориентации 54 частиц порошка по 26 параметрам. Для оценки морфологических характеристик частиц по-

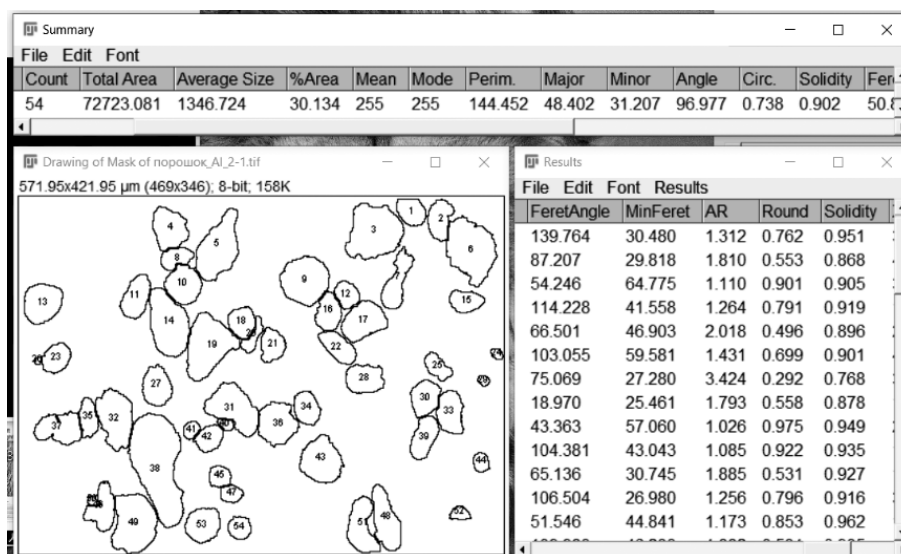


Рис. 1. Вывод результатов в виде трех отдельных окон

Таблица 2. Статистические данные основных морфологических характеристик

Параметр	Диапазон	Среднее значение	Стандартное отклонение $\sigma$	Коэффициент вариации $CV, \%$
$S_{\text{ч}}, \text{мкм}^2$	51–5638	1347	$\pm 1039$	77
$P_{\text{ч}}, \text{мкм}$	26–356	145	$\pm 64$	44
$L_{\text{max}}, \text{мкм}$	9–136	48	$\pm 22$	46
$L_{\text{min}}, \text{мкм}$	9–61	31	$\pm 13$	42
$C$	0,41–0,94	0,74	$\pm 0,13$	18
$F_{\text{max}}, \text{мкм}$	10–138	51	$\pm 23$	45
$F_{\text{min}}, \text{мкм}$	7–65	34	$\pm 14$	41
$AR$	1,03–3,42	1,59	$\pm 0,52$	33
$R$	0,29–0,98	0,68	$\pm 0,17$	25
$S$	0,64–0,96	0,90	$\pm 0,05$	6
$AR_F$	1,06–2,78	1,53	$\pm 0,38$	25
$K$	0,54–0,99	0,82	$\pm 0,11$	13
$E$	0,38–0,82	0,69	$\pm 0,08$	12
$\alpha$ , град.	2–178	97	$\pm 43$	44
$\alpha_F$ , град.	13–170	97	$\pm 41$	42

рошка алюминия проведем статистический и корреляционный анализ [3], чтобы выявить взаимосвязи между параметрами и сделать выводы о свойствах частиц.

Статистические данные основных морфологических характеристик представлены в табл. 2.

Изменение в широких диапазонах значений таких характеристик, как  $S_{\text{ч}}$ ,  $P_{\text{ч}}$ ,  $L_{\text{max}}$ ,  $L_{\text{min}}$ ,  $F_{\text{max}}$  и  $F_{\text{min}}$ , свидетельствует о значительном разбросе частиц по размерам. Значения параметров, характеризующих форму частиц, таких как  $AR$ ,  $R$ ,  $K$  и  $E$ , указывают на вытянутую форму и отсутствие сферичности, а значение параметра  $S$ , близкое к 1, – на отсутствие значительных неровностей на поверхности частиц. Широкий разброс значений параметров  $\alpha$  и  $\alpha_F$  указывает на случайную ориентацию частиц на изображении.

Для установления взаимосвязей между морфологическими характеристиками частиц был проведен корреляционный анализ, направленный на выявление статистически значимых зависимостей между определяемыми величинами. Результаты корреляционного анализа позволяют, во-первых, определить степень связи между размерными характеристиками и характеристиками формы, во-вторых, выбрать определяющие характеристики размера и формы, по которым можно судить об остальных параметрах, в-третьих, установить взаимосвязь морфологических характеристик частиц с технологией их получения и дальнейшей областью применения при изготовлении порошковых материалов различного назначения.

Корреляционная матрица, рассчитанная с использованием коэффициента Пирсона  $r$ , в виде «тепловой карты» [4] представлена на рис. 2. Считается [3], что если значения коэффициента Пирсона  $|r|$  находятся в диапазоне 0–0,3, то взаимосвязь между параметрами очень слабая, 0,3–0,5 – слабая, 0,5–0,7 – средняя, 0,7–0,9 – высокая, 0,9–1,0 – очень высокая.

Проводим корреляционный анализ в следующей последовательности: взаимосвязь размерных характеристик; взаимосвязь характеристик формы; связь между характеристиками формы и размеров.

Размерные характеристики  $S_{\text{ч}}$ ,  $P_{\text{ч}}$ ,  $L_{\text{max}}$ ,  $L_{\text{min}}$ ,  $F_{\text{max}}$ ,  $F_{\text{min}}$  между собой находятся в высокой положительной корреляции ( $r = 0,74–0,97$ ), что позволяет использовать одну или две из них для оценки других размерных характеристик частиц.

Характеристики формы частиц  $C$ ,  $AR$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $AR_F$ ,  $K$ ,  $E$  имеют более сложные взаимосвязи, включающие как положительные, так и отрицательные корреляции.

Параметр  $C$  имеет средние положительные корреляции с параметрами  $S$  ( $r = 0,65$ ),  $K$  ( $r = 0,67$ ),  $R$  ( $r = 0,62$ ), и  $E$  ( $r = 0,51$ ), и отрицательные корреляции с  $AR$  ( $r = -0,62$ ),  $AR_F$  ( $r = -0,63$ ). Это свидетельствует о том, что частицы более круглой формы (высокая  $C$ ) имеют гладкие края ( $S$ ), компактную форму ( $K$ ) и меньшую вытянутость (низкие  $AR$  и  $AR_F$ ).

Параметры  $AR$  и  $AR_F$  находятся в очень высокой положительной корреляции между собой ( $r = 0,95$ ) и в очень высоких отрицательных кор-

	$S_q$	$P_q$	$L_{max}$	$L_{min}$	$C$	$F_{max}$	$F_{min}$	$AR$	$R$	$S$	$AR_F$	$K$	$E$
$S_q$	1	0,95	0,91	0,89	-0,28	0,92	0,92	0,15	-0,15	0,05	0,14	-0,14	0,02
$P_q$	0,95	1	0,93	0,84	-0,42	0,95	0,87	0,2	-0,2	-0,07	0,21	-0,23	-0,07
$L_{max}$	0,91	0,93	1	0,74	-0,39	0,97	0,76	0,27	-0,27	-0,03	0,28	-0,23	-0,07
$L_{min}$	0,89	0,84	0,74	1	-0,18	0,77	0,94	-0,06	0,06	0,09	-0,06	-0,03	0,14
$C$	-0,28	-0,42	-0,39	-0,18	1	-0,39	-0,22	-0,62	0,62	0,65	-0,63	0,67	0,51
$F_{max}$	0,92	0,95	0,97	0,77	-0,39	1	0,79	0,22	-0,22	-0,02	0,25	-0,22	-0,06
$F_{min}$	0,92	0,87	0,76	0,94	-0,22	0,79	1	-0,03	0,03	0,08	-0,03	-0,05	0,14
$AR$	0,15	0,2	0,27	-0,06	-0,62	0,22	-0,03	1	-0,99	-0,39	0,95	-0,95	-0,61
$R$	-0,15	-0,2	-0,27	0,06	0,62	-0,22	0,03	-0,99	1	0,39	-0,95	0,95	0,61
$S$	0,05	-0,07	-0,03	0,09	0,65	-0,02	0,08	-0,39	0,39	1	-0,39	0,42	0,49
$AR_F$	0,14	0,21	0,28	-0,06	-0,63	0,25	-0,03	0,95	-0,95	-0,39	1	-0,95	-0,62
$K$	-0,14	-0,23	-0,23	-0,03	0,67	-0,22	-0,05	-0,95	0,95	0,42	-0,95	1	0,65
$E$	0,02	-0,07	-0,07	0,14	0,51	-0,06	0,14	-0,61	0,61	0,49	-0,62	0,65	1

Рис. 2. «Тепловая карта» корреляционной матрицы морфологических характеристик

реляциях с  $K$  ( $r = -0,95$ ) и с  $R$  ( $r = -0,99$  для  $AR$ ,  $r = -0,95$  для  $AR_F$ ). На основании этого можно заключить, что вытянутые частицы (высокие  $AR$  и  $AR_F$ ) имеют низкую округлость ( $R$ ) и компактность ( $K$ ). Высокая корреляция между  $AR$  и  $AR_F$  позволяет использовать один из этих параметров для оценки вытянутости.

Параметры  $R$  и  $K$  находятся в очень высокой положительной корреляции между собой ( $r = 0,95$ ), а также средне положительно коррелируют с  $E$  ( $r = 0,61$  для  $R$ ,  $r = 0,65$  для  $K$ ).

Параметр  $C$  имеет очень слабую отрицательную корреляцию с параметром  $S_q$  ( $r = -0,28$ ) и слабые отрицательные корреляции с параметрами  $P_q$  ( $r = -0,42$ ),  $L_{max}$  ( $r = -0,39$ ) и  $F_{max}$  ( $r = -0,39$ ), что свидетельствует о том, что крупные частицы имеют менее круглую форму.

Параметры  $AR$  и  $AR_F$  находятся в очень слабой положительной корреляции с  $L_{max}$  ( $r = 0,27$  для  $AR$  и  $0,28$  для  $AR_F$ ) и практически не коррелируют с другими размерными параметрами, что говорит о том, что вытянутость частиц больше зависит от формы, чем от размера. Практически отсутствует корреляция параметров формы  $S$  и  $E$  с параметрами размера, например с  $S_q$   $r = 0,05$  для  $S$  и  $r = 0,02$  для  $E$ .

На основании проведенного корреляционного анализа можно заключить, что размерные харак-

теристики ( $S_q$ ,  $P_q$ ,  $L_{max}$ ,  $L_{min}$ ,  $F_{max}$ ,  $F_{min}$ ) сильно коррелируют между собой ( $r = 0,74-0,97$ ), что позволяет использовать одну или две из них, например  $S_q$  и  $F_{max}$ , для упрощения анализа без потери информативности. Параметры формы ( $C$ ,  $AR$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $AR_F$ ,  $K$ ,  $E$ ) характеризуются сложным характером корреляции между собой, однако высокая корреляция между параметрами формы  $AR$  и  $AR_F$  ( $r = 0,95$ ) позволяет выбрать один из них для оценки вытянутости частиц, а параметр  $C$ , учитывая его взаимозависимость как с характеристиками формы, так и с размерными характеристиками, – для оценки округлости, что в конечном итоге определяет такие технологические свойства порошка, как текучесть и насыпная плотность.

Приведенный пример использования плагина *Extended Particle Analyze* программы *ImageJ* позволил разработать блок-схему алгоритма определения размеров, количества и формы частиц по полученным цифровым изображениям, представленную на рис. 3.

Разработанная методика и представленный алгоритм ее реализации могут быть использованы в задачах контроля качества порошков и оптимизации технологических процессов их получения в порошковой металлургии.

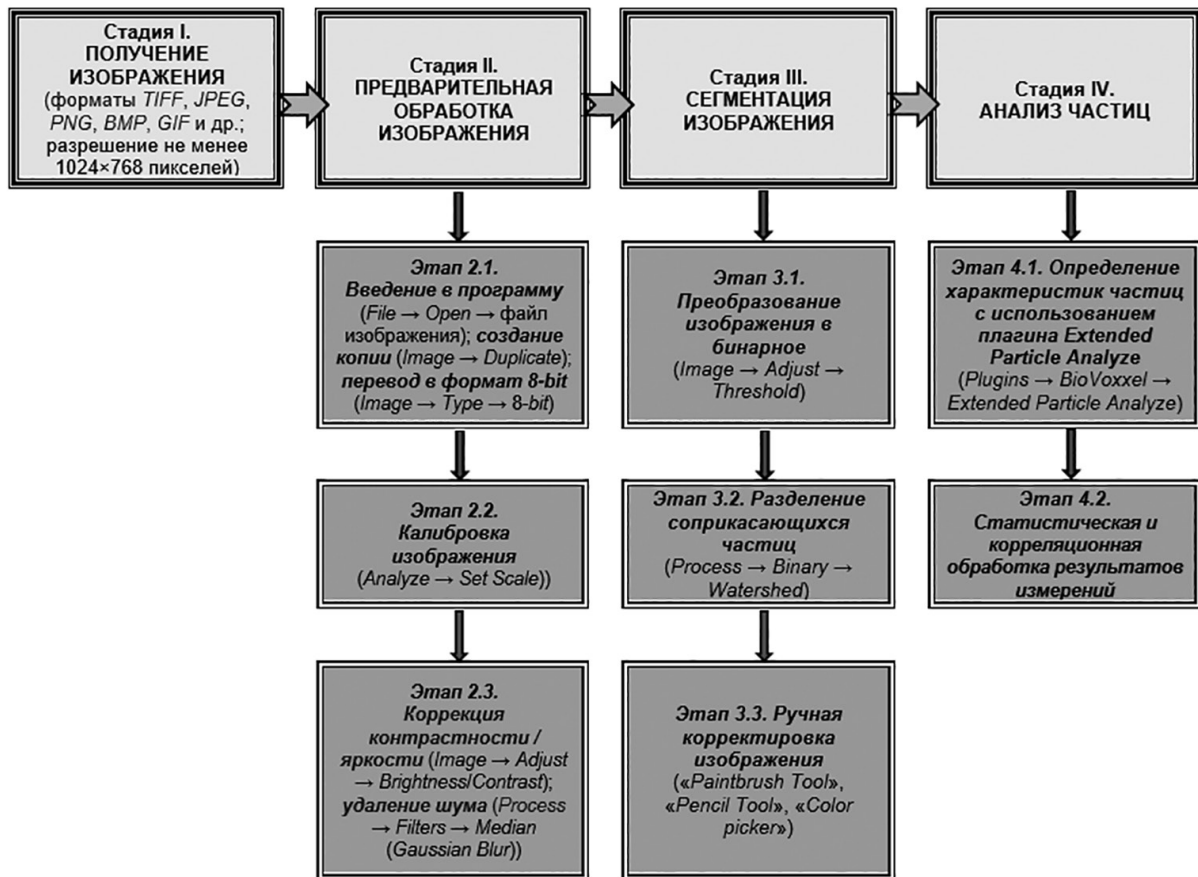


Рис. 3. Алгоритм морфологического анализа частиц с использованием программы *ImageJ*

**Заключение.** В ходе выполненного исследования разработан алгоритм и реализована методика анализа морфологических характеристик частиц порошка с использованием плагина *Extended Particle Analyze* в программе *ImageJ*. Методика охватывает все этапы анализа (сообщения 1 и 2): от получения и предварительной обработки изображения до количественной оценки морфологических параметров частиц и их статистико-корреляционной интерпретации. Применение данной методики к изображению порошка алюминия позволило определить широкий диапазон варьирования параметров формы

и размеров частиц, выявить ключевые зависимости между ними, а также установить значимую роль параметров формы *Circularity*, *Aspect Ratio* и *Solidity* в оценке геометрических и структурных характеристик порошков. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и его применимость для морфологического анализа частиц порошков различной природы. Разработанная методика может быть использована в задачах контроля качества порошков и оптимизации технологических процессов в порошковой металлургии и смежных областях.

### 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. 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.
3. Баврина, А. П. Современные правила применения корреляционного анализа / А. П. Баврина, И. Б. Борисов // Медицинский альманах. – 2021. – № 3 (68). – С. 70–79.
4. Романова, И. К. Современные методы визуализации многомерных данных: анализ, классификация, реализация, приложения в технических системах / И. К. Романова // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. – 2016. – № 03. – С. 133–167. – DOI: 10.7463/0316.0834876.

**EXTENDED MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF POWDER PARTICLES USING  
THE EXTENDED PARTICLE ANALYZER PLUGIN OF THE IMAGEJ SOFTWARE PACKAGE.  
MESSAGE 2. POWDER PARTICLE 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 morphological analysis of powder particles has been developed based on the Extended Particle Analyzer plugin of the ImageJ software package. The method consists of two stages: determining the characteristics of particles using the Extended Particle Analyze plugin and statistical and correlation processing of the measurement results. As an example, the morphological characteristics of aluminum powder particles obtained by spraying were analyzed. Statistical and correlation analysis of the obtained data was carried out, relationships between geometric parameters were revealed, and the main characteristics affecting the shape and size of the particles were determined. The presented method allows for a more detailed and flexible analysis of particles compared to the built-in ImageJ tools, as well as for automating image processing and increasing the accuracy of research in the field of powder metallurgy and materials science.*