

УДК 621.761.27

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-7-302-67-71

*А. С. Переверзев, О. В. Кругляков, А. Е. Агеева***РАЗМЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕДЬСОДЕРЖАЩЕГО ПОРОШКА,
ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОДИСПЕРГИРОВАНИЕМ
МЕТАЛЛООТХОДОВ СПЛАВА БрО5С25*****Юго-Западный государственный университет**

e-mail: chaser-93@yandex.ru

На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на исследование размерных характеристик медьсодержащих порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава БрО5С25 в изопропиловом спирте, установлено следующее: средний объемный диаметр частиц составляет 9,73 мкм; размах размеров частиц составляет 3,65; удельная поверхность частиц составляет 8932 см²/см³; коэффициент элонгации (удлинения) частиц составляет 1,495.

Ключевые слова: металлоотходы сплава БрО5С25, электроэрозионное диспергирование, частицы порошка, размерные характеристики

*A. S. Pereverzev, O. V. Kruglyakov, A. E. Ageeva***DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF A COPPER-CONTAINING
POWDER OBTAINED BY ELECTRODISPERSION
OF METAL WASTE FROM ALLOY BrO5C25*****Southwestern State University**

Based on the conducted experimental studies aimed at studying the dimensional characteristics of copper-containing powders obtained by electrodispersing metal waste from the BrO5C25 alloy in isopropyl alcohol, the following has been established: the average volume diameter of the particles is 9.73 microns; the particle size range is 3.65; the specific surface area of the particles is 8932 cm²/cm³; the coefficient of elongation (elongation) of the particles is 1.495.

Keywords: metal waste of alloy BrO5C25, electroerosion dispersion, powder particles, dimensional characteristics

Введение

В настоящее время значительное количество подшипников скольжения для различных узлов трения машин и агрегатов изготавливают из оловянной литейной бронзы марки БрО5С25 [1–3]. Как следствие накапливаются и значительные объемы металлоотходов данного сплава. Данный сплав в своем составе содержит значительное количество дорогостоящих компонентов, таких как: Cu, Pb, Sn, Zn и др [4, 5]. Одними из наиболее перспективных методов рециклинга металлоотходов являются методы, позволяющие перерабатывать их в порошковые материалы.

Заслуживающим особого внимания является метод, позволяющий измельчать любые токопроводящие материалы в порошки при малых затратах электроэнергии и при отсутствии сточных вод и вредных выбросов [6–8]. Таковым является метод, основанный на расщеплении кусков металлоотходов за счет электрической эрозии [9–12]. Электроэрозионный метод к настоящему времени в промышленности практически

не применяется и в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения о составе, структуре и свойствах порошковых материалов, полученных из металлоотходов бронзы марки БрО5С25.

В связи с этим для оценки возможности практического применения медьсодержащих порошков, полученных электродиспергированием отходов сплава БрО5С25 необходимо провести соответствующие экспериментальные исследования.

Целью настоящей работы являлось исследование размерных характеристик медьсодержащих порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава БрО5С25 в спирте изопропиловом.

**Материалы и методы
проведения исследований**

Диспергируемые металлоотходы – куски подшипников скольжения из оловянной литейной бронзы марки БрО5С25, химический состав которой представлен в табл. 1.

© Переверзев А. С., Кругляков О. В., Агеева А. Е., 2025.

* Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Таблица 1

Химический состав BrO5C25, % масс.

Cu	Pb	Sn	Zn	Sb	Fe	P	Si	Al	Примеси
66,8–73	23–26	4–6	до 0,5	до 0,5	до 0,2	до 0,05	до 0,02	до 0,02	до 1,2

Рабочая жидкость – изопропиловый спирт.

Процесс ЭЭД представляет собой разрушение токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами [13–15]. Получение порошка осуществлялось на экспериментальной установке для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов [Патент RU на изобретение № 2449859] проводилось по схеме, представленной на рис. 1 в четыре этапа:

- 1-й этап – подготовка к процессу электроэрозионного диспергирования;
- 2-й этап – процесс электроэрозионного диспергирования;
- 3-й этап – выгрузка порошка из реактора.
- 4-й этап – сушка и взвешивание порошка оксида алюминия.

На первом этапе производили сортировку металлоотходов, их промывку, сушку, обезжиривание и взвешивание. Реактор заполняли рабочей жидкостью, отходы загружали в реактор. Монтировали электроды. Смонтированные электроды подключали к генератору. Устанавливали необходимые параметры процесса: частоту следования импульсов, напряжение на электродах, емкость конденсаторов.

На втором этапе – этапе электроэрозионно-

го диспергирования включали установку. Процесс ЭЭД представлен на рис. 2. Импульсное напряжение генератора 2 прикладывается к электродам 5 и далее к кускам металлотода 8 в реакторе 3. При достижении напряжения определенной величины происходит электрический пробой рабочей среды 10, находящийся в межэлектродном пространстве, с образованием канала разряда. Благодаря высокой концентрации тепловой энергии, материал в точке разряда плавится и испаряется, рабочая среда испаряется и окружает канал разряда газообразными продуктами распада (газовым пузырем 9). В результате развивающихся в канале разряда и газовом пузыре значительных динамических сил, капли расплавленного материала выбрасываются за пределы зоны разряда в рабочую среду, окружающую электроды, и застывают в ней, образуя каплеобразные частицы порошка 7. Регулятор напряжения 1 предназначен для установки необходимых значений напряжения, а встряхиватель 4 передвигает один электрод, что обеспечивает непрерывное протекание процесса ЭЭД.

На третьем этапе проводится выгрузка рабочей жидкости с порошком из реактора.

На четвертом этапе происходит выпаривание раствора, его сушка, взвешивание, фасовка, упаковка и последующий анализ порошка.

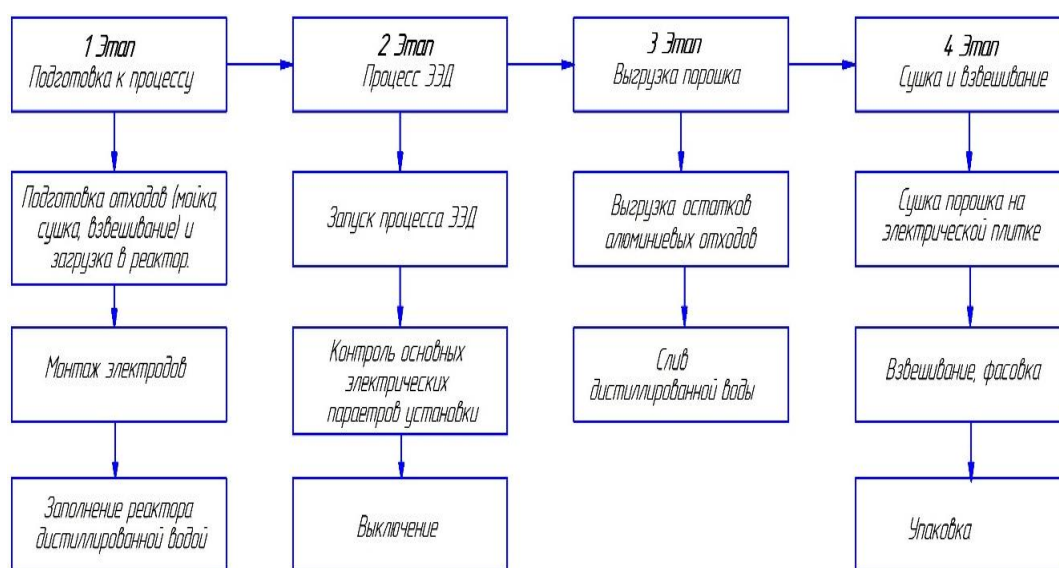


Рис. 1. Этапы получения порошка

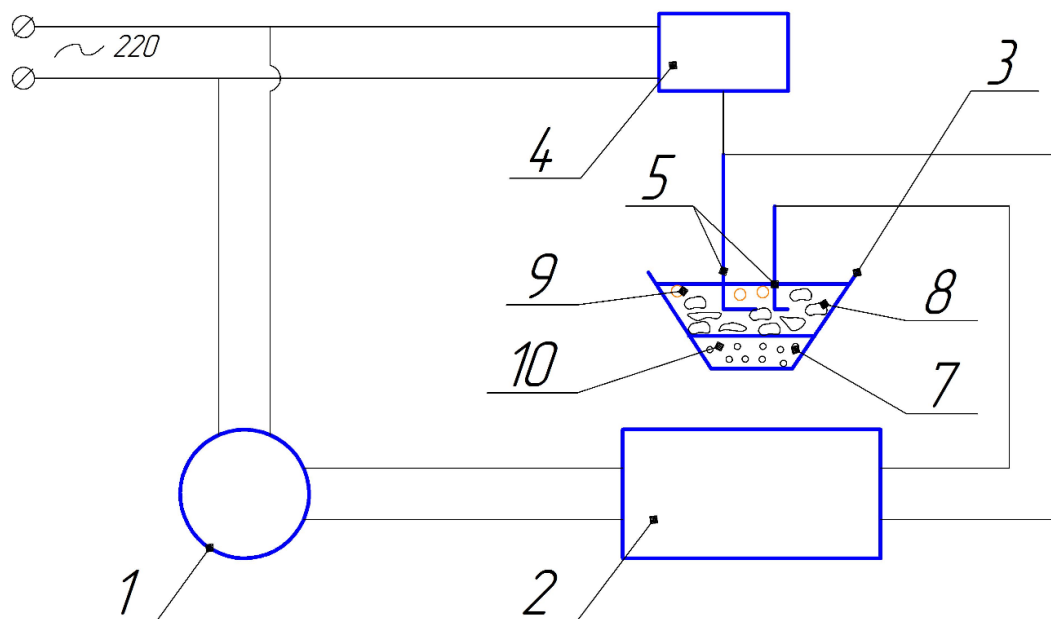


Рис. 2. Схема процесса ЭЭД металлоотходов

Полученный порошок исследовали различными методами. Коэффициент элонгации и распределения по размерам частиц порошка изучали с помощью анализатора размеров частиц «Analysette 22 NanoTec». Форму частиц изучали на сканирующем электронно-ионном микроскопе (СЭМ) «QUANTA 600 FEG».

Результаты исследований

Достаточно важной характеристикой электроэрозионных частиц, от которых зависит область их практического применения являются размерные характеристики, такие как коэффициент элонгации (удлинения) и фракционный состав.

Результаты исследования коэффициента элонгации (удлинения) титановых частиц, полученных из отходов сплава ВрО5С25 в изопропиловом спирте, представлены исследованиями на лазерном анализаторе (рис. 3, а) и изображениями частиц, полученными на сканирующем электронно-ионном микроскопе (СЭМ) (рис. 3, б).

Информация дифракционных картин может использоваться не только для определения размера частиц, но и для анализа их формы. Частицы несферической формы рассеивают излучение в их предпочтительных пространственных направлениях. Если в лазерный пучок попадает не слишком большое количество частиц, на основе получаемой информации может выполняться анализ их формы. За счет уникаль-

ной возможности перемещения в сходящемся лазерном пучке, при анализе формы частиц измерительная ячейка подводится ближе к детектору, благодаря чему первый дифракционный максимум излучения, рассеянного частицами среднего размера, попадает в зоны детектора, чувствительные к форме частиц. Поскольку диаметр сходящегося лазерного пучка уменьшается по мере приближения к детектору, в этом месте в лазерном пучке находится точно то небольшое количество частиц, которое необходимо для анализа их формы. Азимутально (лучеобразно) расположенные элементы детектора регистрируют флуктуации рассеянного излучения, на основе которых компьютерной программой анализируется форма частиц. Программа позволяет определять отношение элонгации для значения $\times 50$ ранее измеренного распределения, а также судить о «граненности» частиц.

Среднее значение коэффициента элонгации (K^{cp}) частиц порошка вычисляли путем соотношения их максимального и минимального диаметров.

Экспериментально установлено, что медьсодержащие частицы, имеют коэффициент элонгации (удлинения) порядка 1,495, что в совокупности изображениям с растрового микроскопа говорит о том, что данные частицы имеют в основном сферическую и эллиптическую форму.

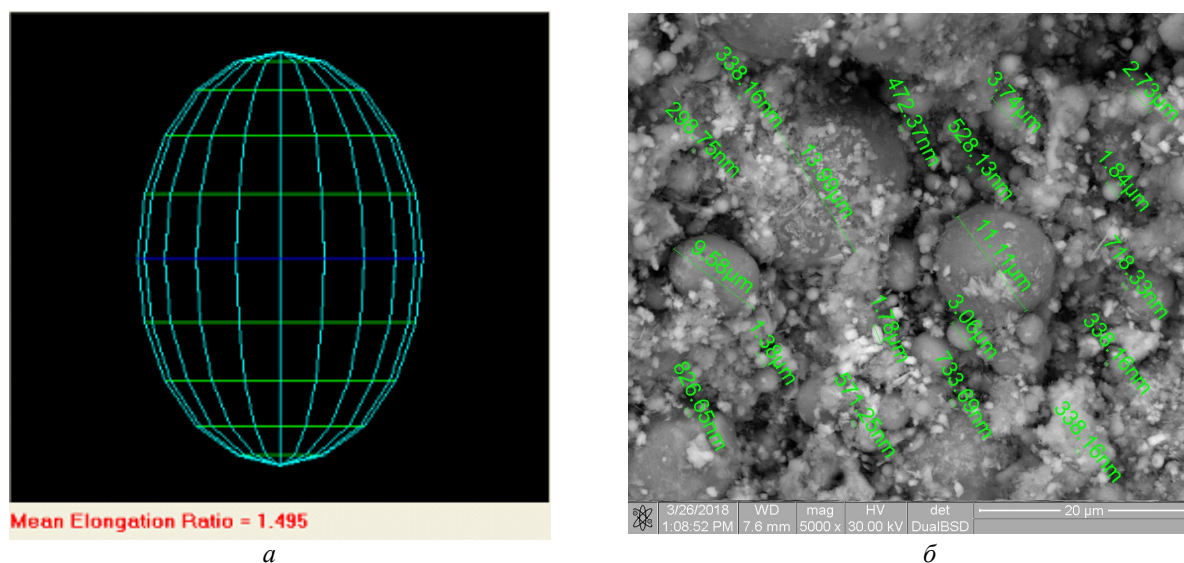


Рис. 3. Частицы медьсодержащего порошка:
а – параметры формы частиц; б – СЭМ-изображение

В процессе электродиспергирования частицы сплава BrO5C25 , которые выбрасывались из канала электрического разряда в расплавленном виде в реактор, заполненный рабочей жидкостью, очень быстро кристаллизовались. Процесс быстрой кристаллизации расплавленного материала в жидкой рабочей среде (спирте) способствовал приданию частицам формы сферы и эллипса.

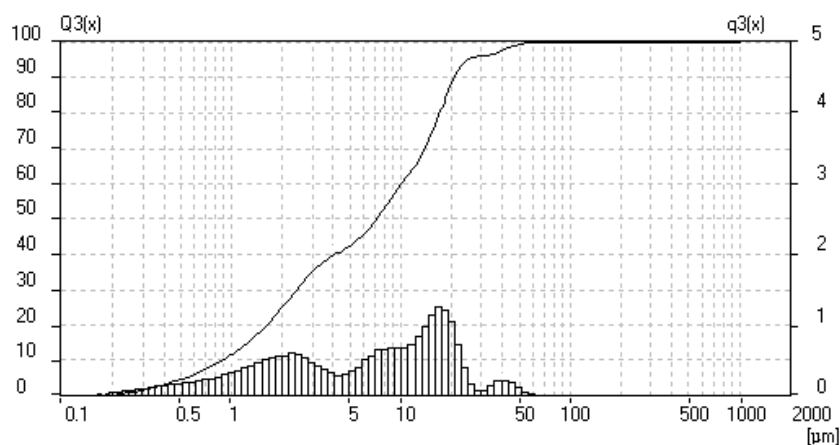
Результаты исследования размерных характеристик полученного порошка на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 Micro-Tecplus» представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Размерная характеристика D_{50} равная 9,73 мкм говорит о том, что в исследуемой пробе порошка частиц с размером меньшим или равным 9,73 мкм содержится 50 %.

Таблица 2

Размерные характеристики частиц порошка

Размерная характеристика	Величина параметра
D_5 , мкм	0,56
D_{10} , мкм	2,65
D_{25} , мкм	6,54
D_{50} , мкм	9,73
D_{75} , мкм	19,54
D_{90} , мкм	38,25
D_{95} , мкм	46,88
D_{99} , мкм	59,56
Средний объемный диаметр, мкм	9,73
Размах $(d_{90}-d_{10})/d_{50}$	3,65
Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{см}^3$	8932



Интегральная кривая и гистограмма: интегральная кривая в координатах $Q_3(x)=f(\mu\text{m})$ (левая шкала) – каждая точка на кривой, сколько % образца имеет размер частиц меньше либо равно данному. Гистограмма в координатах $q_3(x)=f(\mu\text{m})$ (правая шкала) – количество образца с данным размером частиц

Рис. 4. Гранулометрический состав частиц медьсодержащего порошка

Экспериментально установлено, что средний объемный диаметр частиц титанового порошка равен 9,73 мкм, а удельная поверхность – 8932 см²/см³.

Отмечено, что электроэрозионный способ позволяет получить медьсодержащие порошки из металлоотходов без использования химических реагентов, что существенно влияет на себестоимость порошка и позволяет избежать загрязнения рабочей жидкости и окружающей среды химическими веществами.

Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на исследование размерных характеристик медьсодержащих порошков, полученных электродиспергированием металлоотходов сплава БрО5С25 в изопропиловом спирте, установлено следующее: средний объемный диаметр частиц составляет 9,73 мкм; размах размеров частиц составляет 3,65; удельная поверхность частиц составляет 8932 см²/см³; коэффициент элонгации (удлинения) частиц составляет 1,495.

Проведенные исследования показали, что способом электроэрозионного диспергирования металлоотходов сплава БрО5С25 в изопропиловом спирте имеется возможность получения медьсодержащих порошков сферической и эллиптической форм требуемого фракционного состава из вторичного сырья мелкими партиями при минимальных затратах энергии и минимальном уровне окружающей среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стерхов, А. В.* Бронза и ее сплавы / А. В. Стерхов // Арматуростроение. – 2022. – № 1(136). – С. 42–45.
2. *Камаев, А. С.* Оловянная бронза, область применения и ее свойства / А. С. Камаев // Молодой ученый. – 2021. – № 19(361). – С. 30–32.
3. *Бирюков, В. П.* Определение триботехнических свойств сплавов латуни и бронзы / В. П. Бирюков, А. А. Якубовский, А. А. Двоглазов // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – № 33. – С. 12–15.

4. *Тебякин, А. В.* Многофункциональные медные сплавы / А. В. Тебякин, А. Н. Фоканов, В. Ф. Подуражная // Труды ВИАМ. – 2016. – № 12(48). – С. 5.
5. Влияние легирования на свойства медных сплавов / В. А. Кукареко, А. Н. Григорчик, Е. И. Марукович [и др.] // Металлургия машиностроения. – 2020. – № 3. – С. 30–31.
6. *Ageeva E.V.* Morphology of copper powder produced by electrospark dispersion from waste / E.V. Ageeva, N.M. Khor'yakova, E.V. Ageev // Russian Engineering Research, 2014. – Vol. 34(11). – Pp. 694–696.
7. *Ageeva E.V.* Morphology and composition of copper electrospark powder suitable for sintering / E.V. Ageeva, N.M. Khor'yakova, E.V. Ageev // Russian Engineering Research, 2015. – Vol. 35(1). – Pp. 33–35.
8. *Ageev, E.V.* Investigation into the properties of electroerosive powders and hard alloy fabricated from them by isostatic pressing and sintering / E.V. Ageev, R.A. Latypov, E.V. Ageeva // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2015. – Vol. 56(1). – Pp. 52–62.
9. *Ageeva E.V.* Nanopowder produced from high-speed steel waste by electrospark dispersion in water / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, V.Y. Karpenko // Russian Engineering Research, 2015. – Vol. 35(3). – Pp. 189–190.
10. *Latypov R.A.* Electroerosion micro- and nanopowders for the production of hard alloys / R.A. Latypov, E.V. Ageeva, O.V. Kruglyakov, G.R. Latypova // Russian Metallurgy (Metally), 2016. – Vol. 2016(6). – Pp. 547–549.
11. *Latypov R.A.* Elemental Composition of the Powder Particles Produced by Electric Discharge Dispersion of the Wastes of a VK8 Hard Alloy / R.A. Latypov, E.V. Ageev, G.R. Latypova, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // Russian Metallurgy (Metally), 2017. – Vol. 2017(12). – Pp. 1083–1085.
12. *Latypov R.A.* Manufacture of Cobalt–Chromium Powders by the Electric Discharge Dispersion of Wastes and Their Investigation / R.A. Latypov, E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // Russian Metallurgy (Metally), 2018. – Vol. 2018(12). – Pp. 1177–1180.
13. *Ageev, E. B.* Получение порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) отходов твердых сплавов для наплавки шеек коленчатых валов / Е. В. Агеев, М. Е. Сальков // Технология металлов. – 2008. – № 5. – С. 34–36.
14. *Ageev, E. B.* Форма и морфология поверхности частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердых сплавов, содержащих вольфрам / Е. В. Агеев // Технология металлов. – 2011. – № 7. – С. 30–32.
15. *Ageev, E. B.* Гранулометрический и фазовый составы порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в керосине / Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, Е. А. Воробьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 11–14.