

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ СПОСОБОМ

В. В. Соловьев, С. В. Коновалов, Е. Д. Крюкова

*В статье рассмотрен метод получения порошковых материалов – метод электроэрозионного диспергирования (ЭДД), имеющий широкое применение в промышленности. Исследованы частицы порошков на основе цветных металлов, полученные при взаимодействии разноименных электродов методом электроэрозионного диспергирования. Выявлены морфологические особенности образования частиц порошка. Представлен график изменения массы электродов с течением времени. Определен элементный состав полученного порошкового материала с помощью элементного анализа гранул.*

*Ключевые слова: электроэрозионное диспергирование, цветные металлы, морфологические особенности, частицы порошка, элементный анализ гранул.*

Получение порошковых материалов представляет собой комплексную задачу формирования необходимых физико-механических характеристик. Одним из способов получения порошковых материалов является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Изучению процесса эрозии под действием электрического искрового разряда посвящены работы А. Д. Верхотурова, Б. Н. Золотых, К. К. Намитокова и других авторов [1]. Преимуществом метода ЭЭД является низкая энергоемкость, компактность и экологичность. Процесс разрушения материала с образованием гранул порошка осуществляется в локальной области в межэлектродном промежутке (МЭП). Размер зоны воздействия искрового разряда находится в пределах 200 мкм, при этом выделяющаяся энергия составляет до 1 Дж. В результате образуется высокая плотность энергетического потока  $10^6$ – $10^9$  Вт/см. При воздействии искрового разряда происходит образование канала разряда, разогрев поверхности электродов и выброс расплавленного металла в межэлектродный промежуток. Диспергирование осуществляется в жидкости, что позволяет достичь высоких скоростей охлаждения и создать условия для формирования сферических частиц расплавленного металла. В настоящее время использование электроэрозионного диспергирования осуществляется в различных жидких средах: таких как дистиллированная вода, керосин, промышленное масло и алкоголя [2–7, 9, 10]. Для анализа процесса образования эрозионных частиц используются различные методы исследования, в том числе и элементный анализ для определения изменения состава при воздействии [11].

146

Широкое использование метода ЭЭД сдерживается отсутствием в научно-технической литературе сведений о технологических зависимостях и закономерностях формирования порошковых материалов.

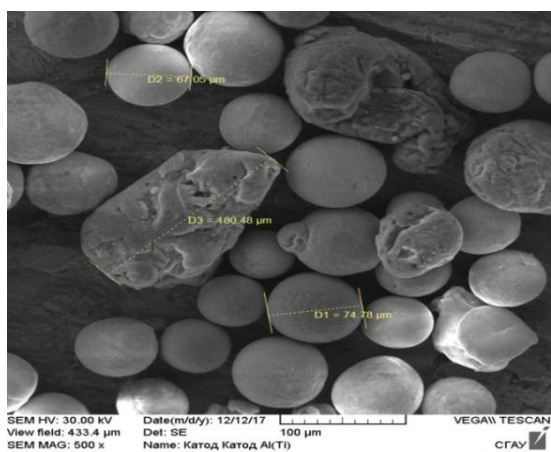
Для получения порошковых материалов на основе цветных металлов использовались электроды: сплав алюминия А5Е (состав: 99,5 % Al), сплав титана ВТ-6 (состав 86,485–91,2 % Ti, 5,3–6,8 % Al, 3,5–5,3 % V, до 0,3% Zr, до 0,1 % С, до 0,3 % Fe). Получение порошкового материала производилось на электроискровой установке «IMPULSE-3» с амплитудой колебания электрода  $100 \pm 10$  Гц, напряжении 130 В, емкость конденсаторов 500 мкФ. Диспергирование осуществлялось в дистиллированной воде. Анализ гранул порошка осуществлялся по фотографиям, полученным на электронном микроскопе Hitachi TM1000, для элементного анализа использовалась рентгеноспектральный анализатор SwiftED-TM EDX. Определение изменения массы анода и катода проводилось на электронных аналитических весах AXISAGN200 с точностью 0,0001 г. Распределение размеров гранул порошка получено обработкой в программе ImageJ и последующей статистической обработкой полученного ряда распределения размеров. Порошковый материал получался в результате искрового разряда между разноименными электродами, при сочетании: катод А5Е (анод ВТ-6), катод ВТ-6 (анод А5Е).

Порошковый материал, полученный в результате искрового разряда, представляет собой гранулы двух типов: шарообразные и неправильной формы [10, 12, 13]. Шарообразные гранулы получают в результате кристаллизации расплавленного металла при взаимодействии материалов электродов. При

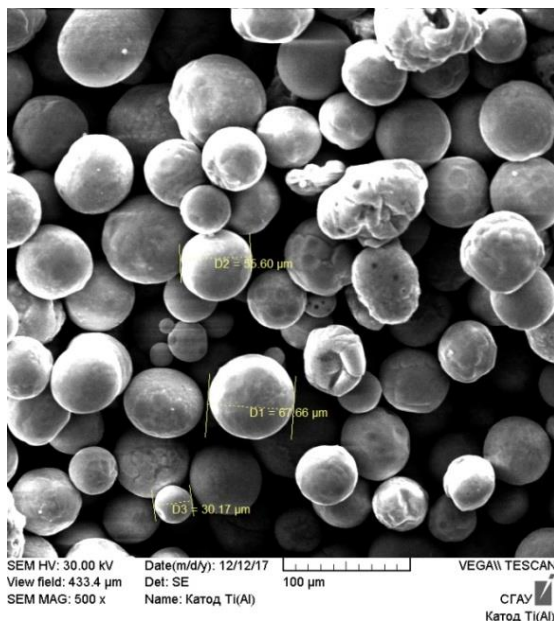
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2018

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ СПОСОБОМ

использовании сплава алюминия в качестве катода наблюдаются более крупные частицы и присутствуют частицы, характерные для хрупкого разрушения электродов. Использование сплава титана в качестве катода приводит к образованию более однородной массы порошка, состоящего из шарообразных частиц с присутствием частиц неправильной формы. Форма и морфология частиц порошковых материалов, полученных методом ЭДД, представлена на рисунке 1.



а)

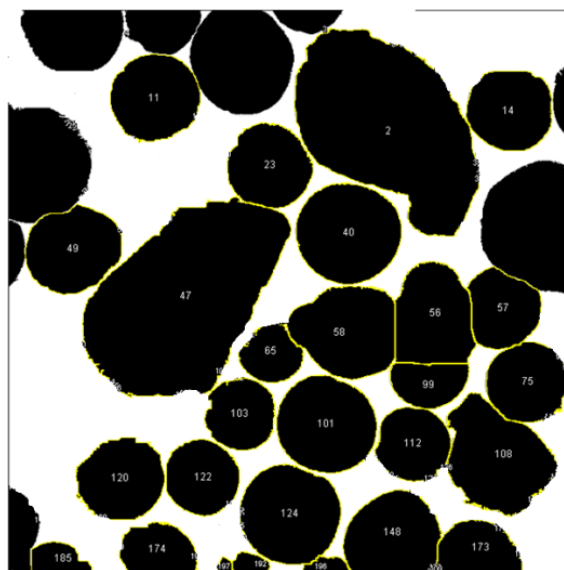


б)

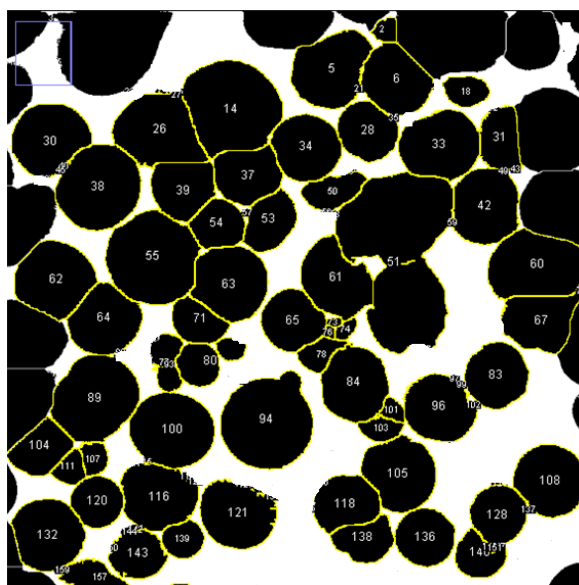
Рисунок 1 – Форма и морфология частиц порошков: а) катод сплав А5Е (анод – ВТ-6); б) катод сплав ВТ-6 (анод – А5Е)

Анализ распределения гранулометрического состава приводился по оцифрованным

фотографиям и отредактированным в программе ImageJ (рисунок 2).



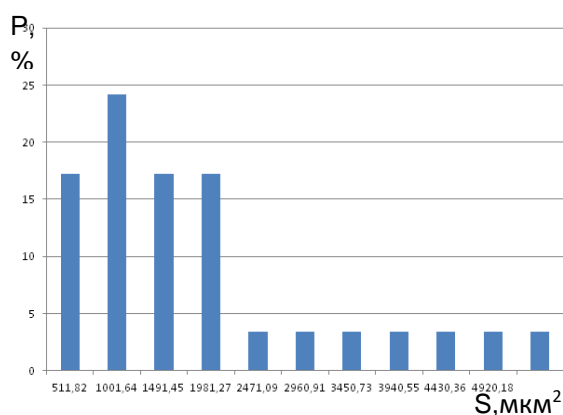
а)



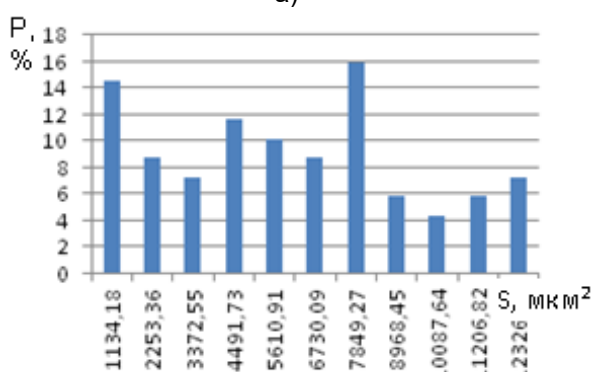
б)

Рисунок 2 – Обработанные фотографии: а) катод сплав А5Е (анод – ВТ-6); б) катод сплав ВТ-6 (анод – А5Е)

Статистическая обработка оцифрованных фотографий дает распределение гранулометрического состава (площади частиц), для катода АЕ5 наблюдается концентрация размеров гранул порошка в области меньших размеров (рисунок 3, а), что соответствует шарообразным частицам. Для материала ВТ-6 характерно более равномерное распределение размеров частиц (рисунок 3, б).



а)



б)

Рисунок 3 – Гранулометрический состав порошков цветных металлов полученных методом ЭЭД: а) АЕ5; б) ВТ-6

При диспергировании в жидкости в первую очередь разрушается катод, но при этом происходит и разрушение анода. Изменение массы электродов представлено на рисунке 4. Из графика видно, что катод разрушается быстрее, чем анод.

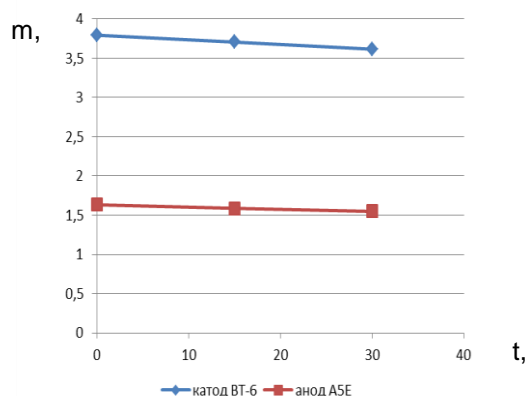


Рисунок 4 – Изменение массы электродов при диспергировании в жидкости

Элементный анализ гранул порошкового материала показал изменение состава и при-

сутствие элементов обоих электродов (таблица 1, 2).

Таблица 1 – Элементный состав порошка (катод сплав А5Е (анод – ВТ-6))

|                | Химические элементы |       |       |        |
|----------------|---------------------|-------|-------|--------|
|                | O                   | Al    | Ti    | Итого  |
| Сред. знач., % | 70,56               | 18,50 | 10,94 | 100,00 |

Таблица 2 – Элементный состав порошка (катод сплав ВТ-6 (анод – А5Е))

| Среднее значение, % | Химические элементы |       |       |        |
|---------------------|---------------------|-------|-------|--------|
|                     | C                   | O     | Al    | Ti     |
|                     | 3,11                | 33,08 | 19,33 | 40,56  |
| Среднее значение, % | Химические элементы |       |       |        |
|                     | V                   | Fe    | Zr    | Итого  |
|                     | 1,07                | 1,87  | 0,98  | 100,00 |

В элементном составе порошка присутствуют как исходные элементы, так и кислород, который попадает из дистиллированной воды при разложении в искровом разряде. Присутствие кислорода согласуется с результатами работы [8], в которой приведены механизмы образования атомарного кислорода в искровом разряде. При использовании ВТ-6 в качестве анода в порошковом материале присутствует Ti, которого до диспергирования не было в составе материала катода. В случае использования анода из алюминиевого сплава А5Е в образованном порошке наблюдается повышенное содержание Al по сравнению с исходным материалом катода и снижение содержания Ti. Уменьшение содержания титана можно объяснить его высокой химической активностью и окислением в воде.

Присутствие элементов разноименных материалов в образованном порошковом материале позволяет говорить о возможности создания интерметаллических соединений при электроэрозионном диспергировании и получении материалов с новыми свойствами отличными от исходных материалов.

Рассмотрено формирование порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования при сочетании алюминиевого и титанового сплава в качестве катодов и анодов. Установлено взаимное проникновение химических элементов материалов и образование порошкового материала, состоящего из материалов электродов. Наличие кислорода в составе электроэрозионного по-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ СПОСОБОМ

рошка обусловлено наличием кислородосодержащей среды (дистиллированная вода).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верхотуров, А. Д. Электродное материаловедение // Новый раздел в области электроэрозионной обработки // Труды ГОСНИТИ / А. Д. Верхотуров, В. И. Иванов, Л. А. Коневцов. – 2011. – Т.108. – с.150–162.

2. Путинцева, М. Н. Химический и фазовый состав порошков путем дисперсии электроэрозии из сплавов WC-Co // Металловедение и термическая обработка / М. Н. Путинцева. – 2004. – Т. 46. – Вып. 3–4. – с.156–160.

3. Петриченко, С. В. Стабилизация импульсов разряда и особенности согласования искровой нагрузки при электроэрозионной дисперсии гранул металла и графита в жидкости // Поверхностная инженерия и прикладная электрохимия / С. В. Петриченко, Д. И. Листовский, Н. И. Кускова. – 2016. – Т.52. – Вып. 2. – с.134–139.

4. Латыпов, Р. А. Электроэрозионные микро- и нанопорошки для производства твердых сплавов // Металлургия России (по металлу) / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеева, О. В. Кругляков, Г. Р. Латыпова. – 2016. – Вып. 6. – с.547–549.

5. Агеев, Е. В. Металлургические особенности производства твердосплавных порошков электроэрозионной дисперсией сплава Т15К6 в бутаноле // Металлургия России (по металлу) / Е. В. Агеев, Р. А. Латыпов, А. С. Угримов. – 2016. – Вып. 12. – с. 1155–1157.

6. Агеев, Е. В. Изготовление и исследование карбидных заготовок из порошков, полученных электроэрозионной дисперсией вольфрамсодержащих отходов // Российский журнал цветных металлов / Е. В. Агеев, Р. А. Латыпов. – 2014. – Т.55. – Вып. 6. – с. 577–580.

7. Дресьянников, А. Ф. Синтез наночастиц металлов железа тридата в водных растворах // Российский журнал общей химии / А. Ф. Дресьянников, М. Е. Колпаков, Е. В. Пронина. – 2010. – Т. 80. – Вып. 10. – с.1901–1907.

8. Байрамов, Р. К. Механизм электрической искровой дисперсии алюминия в водных растворах // Российский журнал хинорганической химии / Р. К. Байрамов, Ю. В. Сомова. – 2014. – Т.59. – Вып. 4. – с. 368–372.

9. Даниленко, Н. Б. Кинетика состава и образования продуктов эрозии металлического заряда в электроразрядном реакторе // Российский журнал прикладной химии / Н. Б. Даниленко,

Г. Г. Савельев, Н. А. Яворовский, Т. А. Юрмазова, А. И. Галанов, П. В. Балухтин. – 2005. – Т.78. – Вып. 9. – с.1438–1443.

10. Агеев, Е. В. Распределение размеров микрочастиц образца порошкообразного алюминия, полученных с использованием электроэрозионной дисперсии // Материалы Международной конференции по машиностроению, автоматизации и системам управления 2015 года / Е. В. Агеев, Е. П. Новиков, А. Ю. Алтухов и др. – М.: MEACS, 2015. – с. 741–944.

11. Латыпов, Р. А. Элементарный состав порошковых частиц, создаваемых дисперсией электрического разряда отложений твердого сплава ВК8 // Металлургия России / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеев, Г. Р. Латыпова, А. Ю. Алтухов, Е. В. Агеева. – 2017. – Вып. 12. – с.1083–1085.

12. Латыпов, Р. А. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде // Все материалы. Энциклопедический справочник / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, Е. П. Новиков. – 2016. – № 4. – с. 19–22.

13. Новиков, Е. П. Исследование формы и морфологии титанового порошка, полученного методом ЭЗД в воде дистиллированной // Материалы 2-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и системная модернизация страны в 4-х томах»: сборник научных трудов / Е. П. Новиков, Е. В. Агеев. – Курск, 2017. – Т.4. – с. 206–209.

**Соловьев Владислав Викторович**, к.т.н., доцент кафедры стартовые и технические ракетные комплексы, Амурский государственный университет; тел. 8(924)447-16-35. E-mail: soloviev.1975@mail.ru.

**Коновалов Сергей Валерьевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева; профессор Уханьского текстильного университета; тел. 8(846)267-46-40. E-mail: ksv@ssau.ru.

**Крюкова Елизавета Дмитриевна**, студент группы 1221-220302D, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева; тел. 8(846)267-46-40. E-mail: liza020998@mail.ru.