

Оригинальная статья

УДК 621.762

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-33-38

**РАЗМЕР ЗЕРНА ЭЛЕКТРОКОРУНДА, СПЕЧЕННОГО ИЗ
ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЯ МАРКИ АД0Е**

© 2023 г. Е. П. Новиков, О. В. Кругляков, А. Е. Агеева

Юго-Западный государственный университет (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94)

Аннотация. Для разработки технологий получения электрокорунда искровым плазменным спеканием диспергированных электроэрозией отходов алюминия и оценки эффективности их практического применения требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Целью настоящей работы являлось определение размера зерна электрокорунда, спеченного из диспергированных отходов алюминия марки АД0Е. Электродиспергирование отходов алюминия осуществляли в дистиллированной воде на оригинальной установке при емкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц. В результате воздействия кратковременных электрических разрядов в воде образовывались частицы электроэрозионного порошка различного размера. Далее проводили сплавление электроэрозионной шихты в системе искрового плазменного сплавления SPS 25-10 «Thermal Technology» (США) при давлении 30 МПа, температуре 560 °С, время выдержки составляло 3 мин. При анализе микроструктуры выявлено, что спеченный электрокорунд имеет мелкозернистое строение, без включений, равномерное распределение фаз. Значительные поры, трещины и несплошности отсутствуют. Размер зерна исследуемых сплавов, определенный с помощью системы автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab» и оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51», составил порядка 0,45 мкм. Малый размер зерна полученного электрокорунда связан с высокой дисперсностью исходной электроэрозионной шихты и эффекта «подавления роста зерна» при искровом плазменном сплавлении за счет короткого времени рабочего цикла, высокого давления и равномерного распределения тепла по образцу при воздействии на него импульсного электрического тока и так называемого «эффекта плазмы искрового разряда». Проведенные исследования необходимы для ресурсосбережения и импортозамещения при получении электрокорунда из отходов алюминия марки АД0Е.

Ключевые слова: отходы алюминия, порошок, спекание, размер зерна

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-2539.2022.4).

Для цитирования: Новиков Е.П., Кругляков О.В., Агеева А.Е. Размер зерна электрокорунда, спеченного из диспергированных отходов алюминия марки АД0Е // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 1 (43). С. 33–38. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-33-38](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-33-38)

Original article

**GRAIN SIZE OF ELECTROCORUNDUM SINTERED FROM DISPERSED WASTE
ALUMINUM GRADE AD0E**

© 2023 г. Е. П. Novikov, O. V. Kryglyakov, A. N. Ageeva

Southwest State University (94, 50 years of October str., Kursk, 654007, Russian Federation)

Abstract. To develop technologies for obtaining electrocorundum by spark plasma sintering of aluminum waste dispersed by electroerosion and to evaluate the effectiveness of their practical application, comprehensive theoretical and experimental studies are required. The purpose of this work was the grain size of

electrocorundum sintered from dispersed aluminum waste of the AD0E brand. Electrodispersion of aluminum waste of the AD0E brand was carried out in distilled water at the original installation with a capacity of 65.5 UF discharge capacitors, a voltage at the electrodes of 200 V, a pulse repetition frequency of 200 Hz. As a result of exposure to short-term electrical discharges, particles of electroerosive powder of various sizes were formed in the water. Further, the fusion of the electroerosion charge was carried out in the spark plasma fusion system SPS 25-10 "Thermal Technology" (USA) at a pressure of 30 MPa, a temperature of 560 °C and a holding time of 3 minutes. Analysis of the microstructure of sintered electrocorundum showed that it has a fine-grained structure, without inclusions, uniform phase distribution and the absence of significant pores, cracks and discontinuities. The grain size of the studied alloys, determined using the SIMAGIS Photolab automated image analysis system and the OLYMPUS GX51 optical inverted microscope, was about 0.45 microns. The small grain size of the resulting electrocorundum is associated with the high dispersion of the initial electroerosion charge and the effect of "grain growth suppression" during spark plasma fusion due to the short working cycle time, high pressure and uniform heat distribution over the sample when exposed to pulsed electric current and the so-called "spark discharge plasma effect". The conducted studies will allow to perform resource conservation and import substitution in the production of electrocorundum from aluminum waste of the AD0E brand.

Keywords: aluminum waste, powder, sintering, grain size

Funding: The work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (МК-2539.2022.4).

For citation: Novikov E.P., Kryglyakov O.V., Ageeva A.N. Grain size of electrocorundum sintered from dispersed waste aluminum grade AD0E. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 1 (43), pp. 33–38. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-33-38](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-33-38)

Введение

В настоящее время алюминий широко распространен в судо-, автомобиле- и авиастроении, в пищевой и холодильной промышленности, при изготовлении бытовых предметов и т.д. Помимо этого алюминий является популярным материалом в строительстве. Это объясняется его отличительными характеристиками и высоким качеством. Среди преимуществ стоит выделить, что этот металл отличается небольшим весом, устойчивостью к атмосферным влияниям, не подвержен коррозионным процессам.

С экономией алюминия тесно связаны мероприятия по сбору отходов алюминиевых сплавов и их переработке [1 – 3]. В отечественной и зарубежной промышленности в настоящее время применяют несколько методов переработки отходов алюминия, которые в большинстве своем характеризуются крупнотоннажностью, энергоемкостью, необходимостью больших производственных площадей, малой производительностью, а также наличием экологических проблем.

Одним из перспективных методов получения порошка практически из любого токопроводящего материала, в том числе отходов алюминия, является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД), который отличается относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса [4 – 9].

Для разработки технологий получения электрокорунда искровым плазменным спеканием диспергированных электроэрозией отходов алюминия и оценки эффективности их практи-

ческого применения требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований [10 – 14].

Целью данной работы являлось определение размера зерна электрокорунда, спеченного из диспергированных отходов алюминия марки АД0Е.

Методы и принципы исследования

Электродиспергирование отходов алюминия марки АД0Е осуществляли в дистиллированной воде на оригинальной установке при емкости разрядных конденсаторов 65,5 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц. В результате воздействия кратковременных электрических разрядов в воде образовывались частицы электроэрозионного порошка различного размера. Далее проводили сплавление электроэрозионной шихты в системе искрового плазменного сплавления SPS 25-10 «Thermal Technology» (США) при давлении 30 МПа, температуре 560 °С, время выдержки составляло 3 мин. Процесс сплавления электроэрозионной шихты схематически приведен на рис. 1.

Электроэрозионную шихту размещали в матрице из графита, помещаемую под пресс в вакуумной камере. Electrodes, интегрированные в механическую часть пресса, подводили электрический ток к матрице и создавали искровые разряды между сплавляемыми частицами шихты, обеспечивая интенсивное взаимодействие.

Размер зерна в сплавах исследовали с помощью системы автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab» и оптического

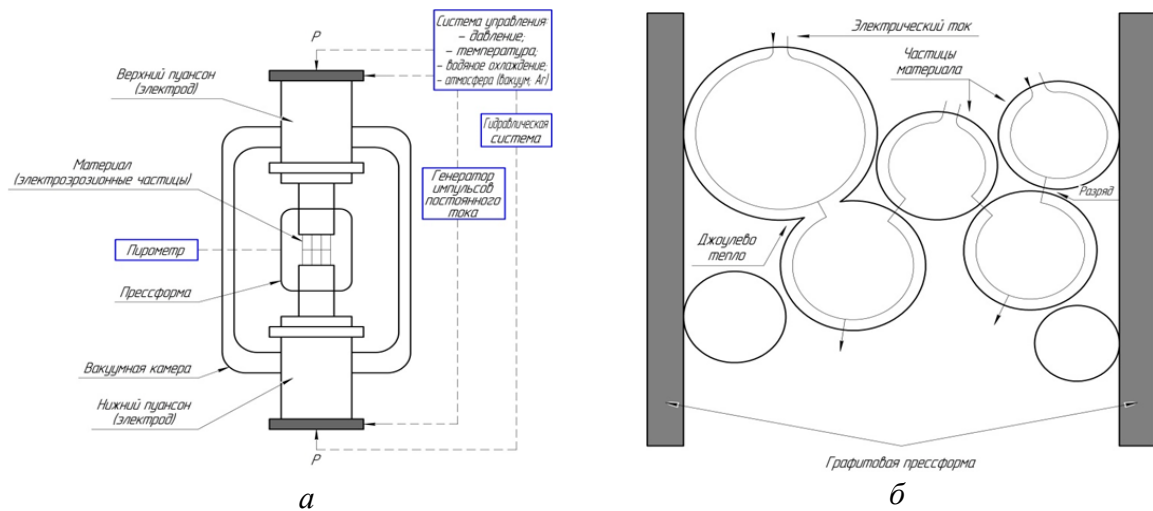


Рис. 1. Схема сплавления электроэрозионной шихты: а – принципиальная схема; б – схема нагрева
 Fig. 1. Scheme of fusion of the electroerosion charge: а – schematic diagram; б – heating circuit

инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51» (Япония).

Блок-схема методики исследования размера зерна и сплавов представлена на рис. 2.

Основные результаты

Полученная с помощью оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51»



Рис. 2. Блок-схема методики исследования размера зерна
 Fig. 2. Block diagram of the grain size research methodology

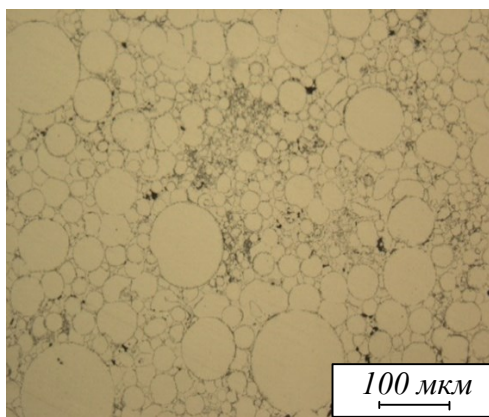


Рис. 3. Микроструктура спеченного электрокорунда
Fig. 3. Microstructure of sintered electrocorundum

микроструктура исследуемого образца спеченного электрокорунда, представлена на рис. 3.

Анализ микроструктуры показал, что спеченный электрокорунд имеет мелкозернистое строение, без включений, равномерное распределение фаз. Значительные поры, трещины и несплошности отсутствуют.

Размер зерна исследуемых сплавов, определенный с помощью системы автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab» и оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51», составил порядка 0,45 мкм.

Обсуждение

Малый размер зерна полученного электрокорунда связан с высокой дисперсностью исходной электроэрозионной шихты и эффекта «подавления роста зерна» при искровом плазменном сплавлении за счет короткого времени рабочего цикла, высокого давления и равномерного распределения тепла по образцу при воздействии на него импульсного электрического тока и так называемого «эффекта плазмы искрового разряда».

Вывод

Проведенные исследования способствуют ресурсосбережению и позволяют осуществлять импортозамещение при получении электрокорунда из отходов алюминия марки АД0Е.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванков С.И., Троицкий А.В. Использование отходов производства алюминия в различных отраслях промышленности // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2020. № 3. С. 27–37. <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2020-03-2>
2. Яковец Ю.С. Утилизация отходов алюминия // Юный ученый. 2020. № 11 (41). С. 46–49.
3. Трибушевский Л.В., Немененок Б.М., Румянцева Г.А. Бесфлюсовая плавка отходов алюминия - путь к безотходной технологии // *Металлургия машиностроения*. 2020. № 2. С. 2–4.
4. Пикалов С.В., Агеева А.Е. Элементный состав высокопрочных быстрорежущих сталей на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава Р6М5. В кн.: *Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых*. Сб. науч. ст. 2-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок. Курск: 2021. С. 115–118.
5. Пикалов С.В., Агеева А.Е. Микроструктура высокопрочных быстрорежущих сталей на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава Р6М5. В кн.: *Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства*. Сб. науч. ст. Международной научно-практической конференции. Курск: 2021. С. 207–210.
6. Пикалов С.В., Агеева А.Е. Фазовый состав высокопрочных быстрорежущих сталей на основе диспергированных электроэрозией частиц сплава Р6М5. В кн.: *Наука молодых – будущее России*. Сб. науч. ст. 6-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск: 2021. С. 150–153.
7. Бобков Е.А., Агеева А.Е., Агеева Е.В. Размерные характеристики частиц порошка, полученного электродиспергированием сплава Х20Н80 в керосине / Под общ. ред. М.С. Разумова. В кн.: *Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении*. Сб. науч. ст. 7-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Курск. 2022. С. 37–40.
8. Новиков Е.П., Поданов В.О., Агеева А.Е. Получение электрокорунда электродиспергированием алюминиевых отходов / Под общ. ред. М.С. Разумова. В кн.: *Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении*. Сб. науч. ст. 7-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Курск: 2022. С. 134–138.
9. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Чернов А.С., Маслов Г.С., Паршина Е.И. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2013. № 1 (46). С. 85–90.

10. Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А., Бобрышев Р.В. Разработка установки для получения порошков из токопроводящих материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 5-2. С. 234–237.
 11. Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А. Исследование влияния электрических параметров установки на процесс порошкообразования при электроэрозионном диспергировании отходов твердого сплава // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 5-2. С. 238–240.
 12. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Давыдов А.А., Бондарев С.А., Новиков Е.П., Молодкин А.Ю. Изучение строения и свойств твердосплавных электроэрозионных порошков, используемых для восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 2. С. 69–72.
 13. Хардилов С.В., Агеева Е.В., Агеева А.Е. Анализ характеристик износостойкости спеченных изделий из электроэрозионного порошка стали X13, полученного в бутиловом спирте // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 6 (39). С. 58–64.
- REFERENCES**
1. Ivankov S.I., Troitsky A.V. Use of aluminum production waste in various industries. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchej sredy*. 2020, no. 3, pp. 27–37. <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2020-03-2>. (In Russ.).
 2. Yakovets Yu.S. Recycling of aluminum waste. *Yunyj uchenyj*. 2020, no. 11, pp. 46–49. (In Russ.).
 3. Tribushevsky L.V., Nemenenok B.M., Rumyantseva G.A. Besflus smelting of aluminum waste - the way to waste-free technology. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2020, no. 2, pp. 2–4. (In Russ.).
 4. Pikalov S.V., Ageeva A.E. Elemental composition of high-strength fast-cutting steels based on particles of R6M5 alloy dispersed by electric erosion. In: *Innovative potential for the development of society: the view of young scientists. Collection of scientific articles of the 2nd All-Russian Scientific Conference for Advanced Development*. Kursk: 2021, pp.115–118. (In Russ.).
 5. Pikalov S.V., Ageeva A.E. Microstructure of high-strength fast-cutting steels based on electroerosion-dispersed particles of R6M5 alloy. In: *Actual issues of science, nanotechnology, production. Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference*. Kursk: 2021, pp. 207–210. (In Russ.).
 6. Pikalov S.V., Ageeva A.E. Phase composition of high-strength fast-cutting steels based on particles of R6M5 alloy dispersed by electric erosion. In: *The science of the young – the future of Russia. Collection of scientific articles of the 6th International Scientific Conference for Advanced Development of Young Scientists*. Kursk: 2021, pp. 150–153. (In Russ.).
 7. Bobkov E.A., Ageeva A.E., Ageeva E.V. Dimensional characteristics of powder particles obtained by electrodispersing Kh20N80 alloy in kerosene / Under the general editor M.S. Razumova. In: *Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Collection of scientific articles of the 7th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation*. Kursk: 2022, pp. 37–40. (In Russ.).
 8. Novikov E.P., Podanov V.O., Ageeva A.E. Obtaining an electric corundum by electrodispersing aluminum waste / Under the general editor M.S. Razumova. In: *Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Collection of scientific articles of the 7th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation*. Kursk: 2022, pp. 134–138. (In Russ.).
 9. Ageev E.V., Ageeva E.V., Chernov A.S., Maslov G.S., Parshina E.I. Determination of the main regularities of the process of producing powders by electroerosive dispersion. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013, no. 1 (46), pp. 085–090. (In Russ.).
 10. Ageev E.V., Semnikhin B.A., Latypov R.A., Bobryshev R.V. Development of a plant for producing powders from conductive materials. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2009, vol. 11, no. 5–2, pp. 234–237. (In Russ.).
 11. Ageev E.V., Semnikhin B.A., Latypov R.A. Study of the influence of electrical parameters of the plant on the process of powder formation during the electroerosive dispersion of solid alloy waste. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2009, vol. 11, no. 5–2, pp. 238–240. (In Russ.).
 12. Ageev E.V., Ageeva E.V., Davydov A.A., Bondarev S.A., Novikov E.P., Molodkin A.Yu. Study of the structure and properties of hard alloy electroerosive powders used to restore and strengthen parts of automotive equipment. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2013, no. 2, pp. 69–72. (In Russ.).

13. Hardikov S.V., Ageeva E.V., Ageeva A.E. Analysis of wear resistance characteristics of sintered articles from electric erosion powder of Kh13 steel obtained in butyl alcohol. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2021, no. 6 (39), pp. 58–64. (In Russ.).

Сведения об авторах

Евгений Петрович Новиков, к.т.н., старший научный сотрудник кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет
E-mail: evgeniy-novikov-92@mail.ru

Олег Викторович Кругляков, к.т.н., доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет
E-mail: o.kruglyakov@tmholding.ru

Анна Евгеньевна Агеева, студентка кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет
E-mail: ageevaanna2004@yandex.ru

Information about the authors

Evgenii P. Novikov, Cand. Sci. (Eng.), Senior research of Chair of Materials and Transport Technology, Southwestern State University
E-mail: evgeniy-novikov-92@mail.ru

Oleg V. Kruglyakov, Cand. Sci. (Eng.), Assist Professor of Chair of Materials and Transport Technology, Southwestern State University
E-mail: o.kruglyakov@tmholding.ru

Anna E. Ageeva, student of Materials and Transport Technology, Southwestern State University
E-mail: ageevaanna2004@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.02.2023

После доработки 24.02.2023

Принята к публикации 01.03.2023

Received 20.02.2023

Revised 24.02.2023

Accepted 01.03.2023