

## ЛИТЕЙНЫЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 621.761.27

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-7-302-19-25

*Е. В. Агеев, Е. П. Новиков, В. О. Переверзев*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ ТИТАНОВЫХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ МЕТАЛЛООТХОДОВ СПЛАВА ОТ4 В ВОДЕ\*

Юго-Западный государственный университет

e-mail: ageev\_ev@mail.ru

Представлены результаты исследования параметров формы титановых порошков, полученных для аддитивных машин электроэрозионным диспергированием металлоотходов сплава ОТ4 в воде. Установлено, что электроэрозионные частицы имеют в основном сферическую форму. Изучены технологические особенности получения отечественных титановых порошков сферической формы для аддитивных машин требуемого фракционного состава из отечественного сырья мелкими партиями при минимальных затратах энергии и минимальном уроне окружающей среде.

**Ключевые слова:** отходы титанового сплава ОТ4, электроэрозионное диспергирование, вода, форма частиц, коэффициент элонгации частиц

*E. V. Ageev, E. P. Novikov, V. O. Pereverzev*

### INVESTIGATION OF THE SHAPE PARAMETERS OF TITANIUM POWDERS OBTAINED FOR ADDITIVE MACHINES BY ELECTROEROSION DISPERSION OF OT4 ALLOY METAL WASTE IN WATER

Southwestern State University

The results of a study of the shape parameters of titanium powders obtained for additive machines by electroerosion dispersion of OT4 alloy metal waste in water are presented. It has been established that the electroerosive particles are mainly spherical in shape. The technological features of obtaining domestic spherical titanium powders for additive machines of the required fractional composition from domestic raw materials in small batches with minimal energy consumption and minimal damage to the environment have been studied.

**Keywords:** OT4 titanium alloy waste, electroerosion dispersion, water, particle shape, particle elongation coefficient

#### Введение

На сегодняшний день одно из перспективных и активно развивающихся направлений машиностроения это аддитивные технологии производства изделий из материалов на основе металлов и сплавов. Различные производители аддитивных машин рекомендуют эксплуатировать оборудование только с определенными порошками, как правило, поставляемыми изготовителем аддитивных машин [1–5].

В связи с санкционными ограничениями в настоящее время в области аддитивного производства изделий остро стоит проблема, связанная с необходимостью собственного отечест-

венного производства сферических порошков требуемой марки мелкими партиями и требуемой зернистости [6–10].

Одним из основных требований к порошкам для аддитивных машин является сферическая форма частиц, которая обеспечивает им хорошую текучесть при подаче в рабочую зону [11–14].

Исходя из технологических особенностей применения аддитивными машинами только сферических порошков регламентированной зернистости предлагается технология электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) [15–20], отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой.

© Агеев Е. В., Новиков Е. П., Переверзев В. О., 2025.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00317, <https://rscf.ru/project/24-29-00317/>

той процесса. Главным преимуществом предложенной технологии является применение в качестве исходных материалов металлоотходов, которое значительно дешевле чистых компонентов, используемых в традиционных технологиях. Однако, в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения о составе, структуре и свойствах порошков, полученных электродиспергированием отходов титановых сплавов. Для этого требуется проведение комплексных металлографических исследований.

Целью настоящей работы являлось исследование параметров формы титановых порошков,

полученных для аддитивных машин электро-эрозионным диспергированием металлоотходов сплава ОТ4 в воде.

#### Материалы и методы проведения исследований

Для выполнения намеченных исследований были выбраны металлоотходы, содержащие большое количество дорогостоящего титана, а именно сплав марки ОТ4.

Для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы титанового деформируемого сплава марки ОТ4. Химический состав сплава в соответствии с ГОСТ 19807–91 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав в % материала ОТ4

| Fe     | C      | Si      | Mn    | N       | Ti         | Al    | Zr     | O       | H        | Примесей   |
|--------|--------|---------|-------|---------|------------|-------|--------|---------|----------|------------|
| до 0,3 | до 0,1 | до 0,12 | 0,8–2 | до 0,05 | 91,83–95,4 | 3,5–5 | до 0,3 | до 0,15 | до 0,012 | прочих 0,3 |

Электродиспергирование отходов сплава ОТ4 осуществляли на экспериментальной установ-

ке, представленной на рис. 1 [15–20].

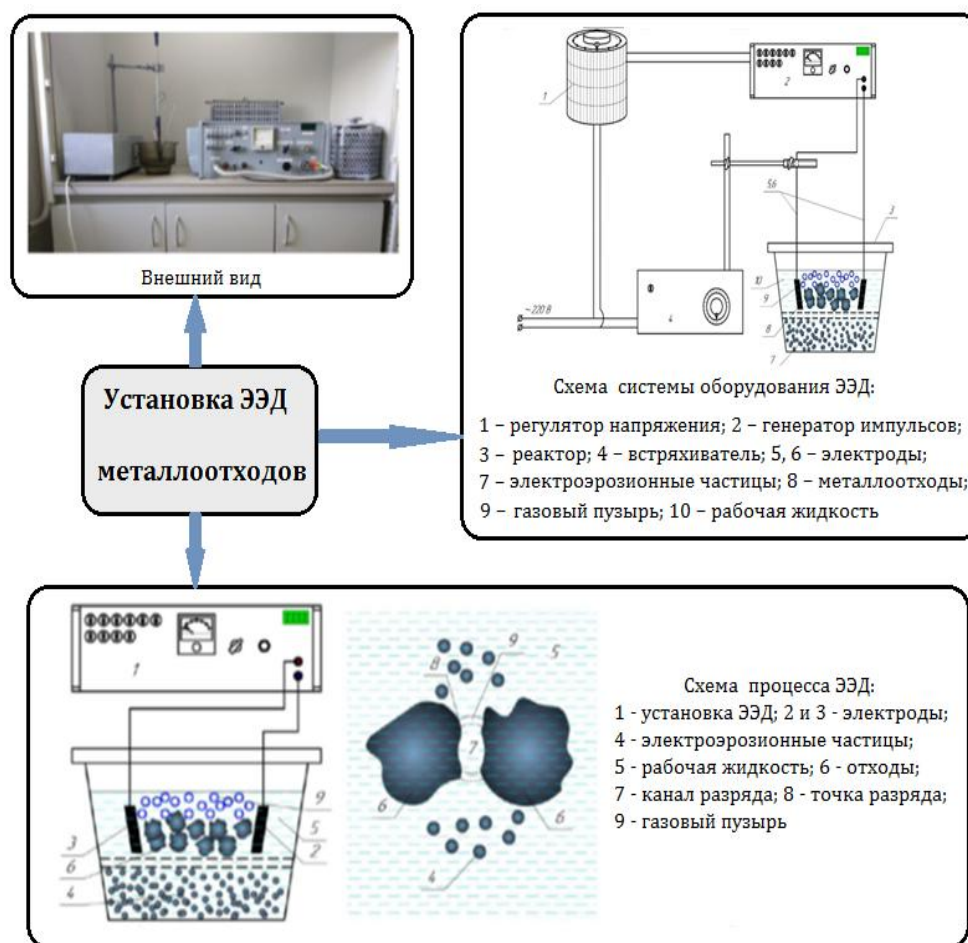


Рис. 1. Блок-схема работы установки ЭЭД

В качестве рабочей жидкости применялась наиболее технологичная и дешевая кислород-содержащая жидкость – вода дистиллированная ГОСТ Р 58144–2018.

Процесс ЭДД металлоотходов сплава ОТ4 проводили в четыре этапа (рис. 2):

– 1-й этап – подготовительный процесс перед

электродиспергированием металлоотходов ОТ4;

– 2-й этап – электродиспергирование металлоотходов ОТ4;

– 3-й этап – выгрузка из реактора продуктов электродиспергирования сплава ОТ4;

– 4-й этап – работа с электроэрозионным порошком.

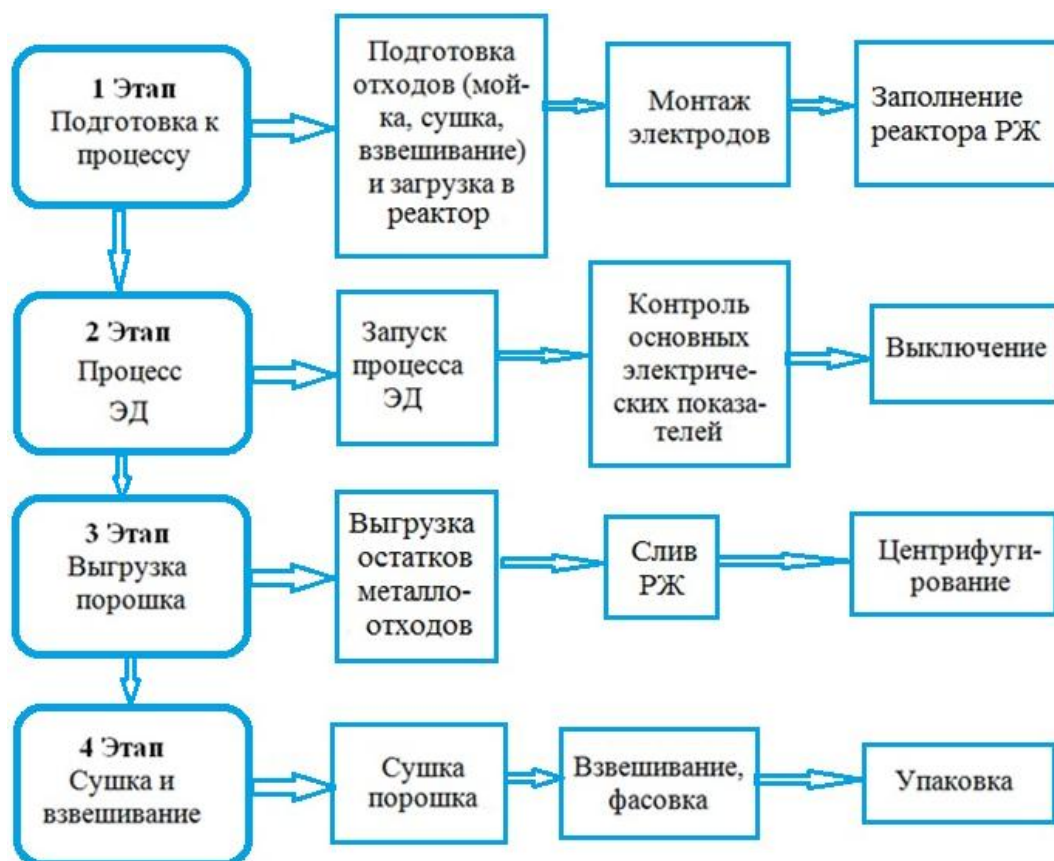


Рис. 2. Схема процесса электродиспергирования металлоотходов сплава ОТ4

Исследование формы и морфологии поверхности частиц, полученных ЭДД отходов титанового сплава марки ОТ4, проводили на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды).

Методика исследования формы частиц представлена в виде блок-схемы на рис. 3.

Коэффициент элонгации (удлинения) частиц порошка исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» (Германия).

Блок-схема методики исследования коэффициента элонгации (удлинения) представлена на рис. 4.

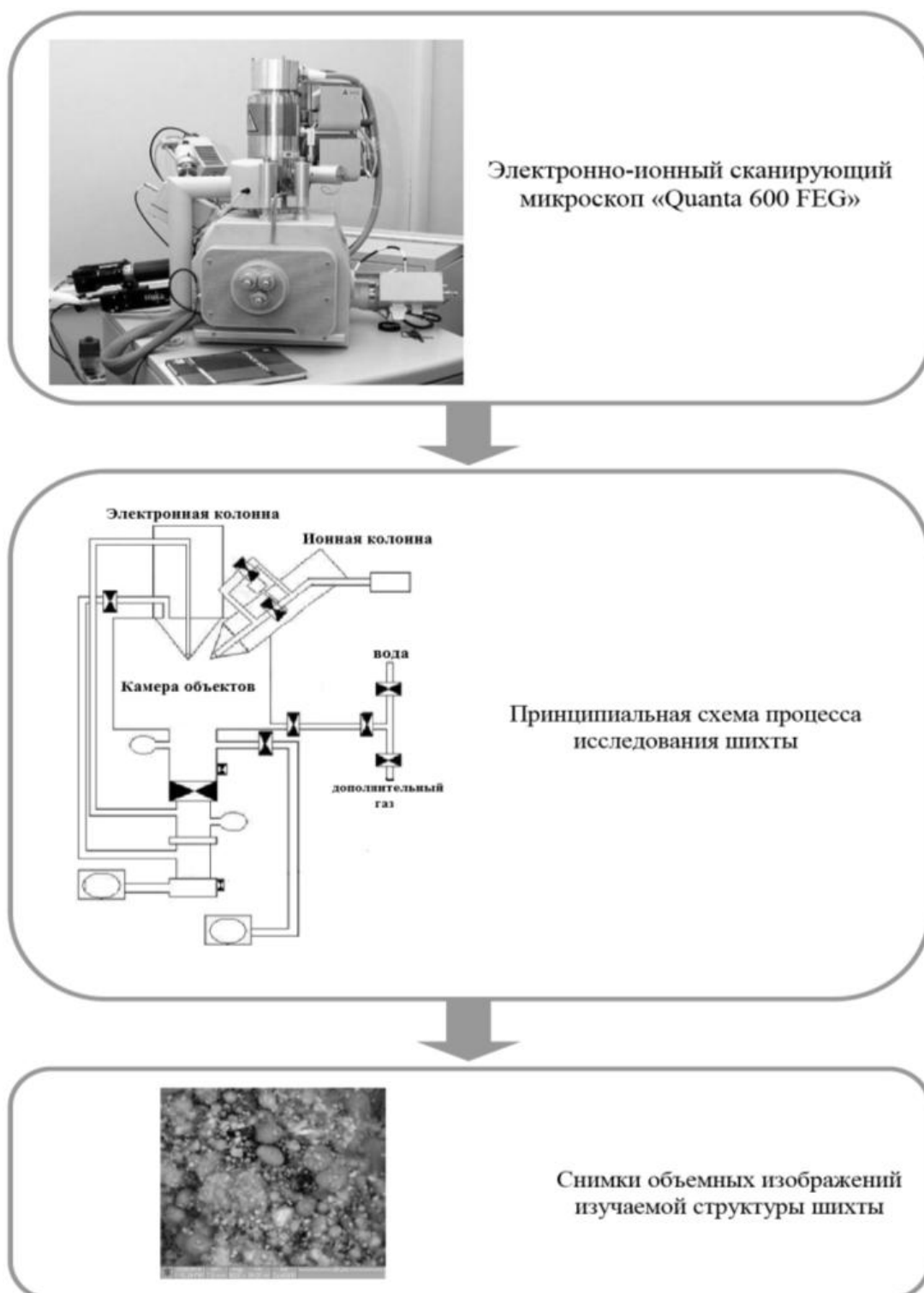


Рис. 3. Блок-схема методики исследования формы частиц электроэрозионного порошка

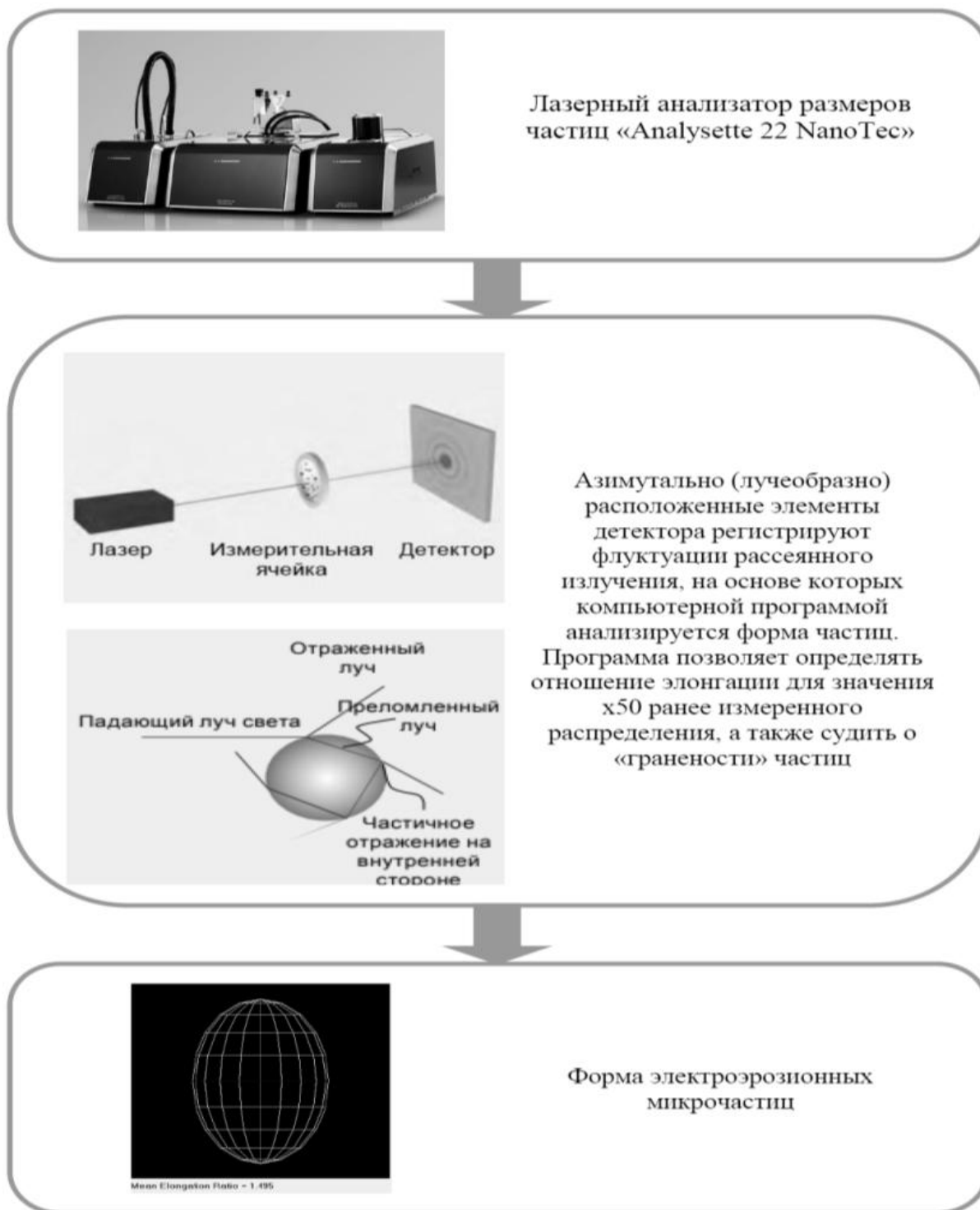


Рис. 4. Блок-схема методики исследования коэффициента элонгации (удлинения) частиц электроэрозионного порошка

#### Результаты исследований

Очень важной характеристикой порошковых материалов для аддитивных машин является форма частиц, от которой зависит их текучесть при подаче в рабочую зону. Поэтому прежде разработки практических рекомендаций

по их практическому применению требуется изучить параметры их формы.

Результаты исследования формы частиц электроэрозионного порошка, полученного в воде, представлены исследованиями изображениями частиц, полученными на электронно-ионном

сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды) (рис. 5) и коэффициента элонгации (удлинения) частиц электроэрозионного порошка

на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес» (Германия) (табл. 2).

Микрофотографии частиц полученного порошка представлена на рис. 5.

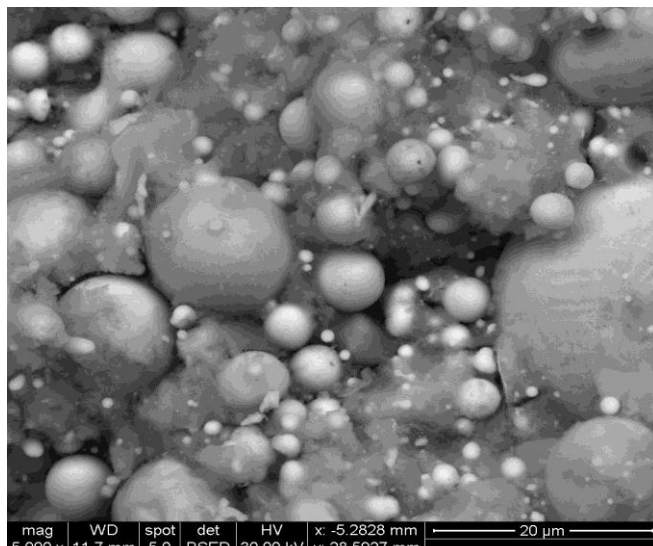


Рис. 5. Микрофотографии частиц электроэрозионного порошка, полученного в воде

Таблица 2

**Коэффициент элонгации (удлинения) частиц электроэрозионного порошка (средние значения)**

| Расчетная схема | Формула / значение                     |
|-----------------|----------------------------------------|
|                 | $K_3^{cp} = d_1/d_2$ $K_3^{cp} = 1,14$ |

Анализ параметров формы частиц электроэрозионного порошка со средним размером 25 ... 100 мкм по величине коэффициента элонгации (удлинения), который составляет 1,14, и изображениям с растрового микроскопа говорит о том, что электроэрозионные частицы имеют сферическую и эллиптическую форму, а также агломераты. Частицы размером менее

25 мкм более склоны к агломерации, поэтому коэффициент элонгации по ним не проводился.

В процессе электродиспергирования частицы металлоотхода, которые выбрасываются из канала электрического разряда в расплавленном виде в реактор, заполненный рабочей жидкостью, очень быстро кристаллизуются. Процесс быстрой кристаллизации расплавленного

материала в жидкой рабочей среде способствует приданию частицам формы сферы и эллипса.

После выхода из зоны разряда частицы расплавленного материала весьма часто сталкиваются между собой. Если в момент столкновения кристаллизация была полностью завершена, то на частицах остаются характерные следы от ударов и сетчатая поверхность. Если же разница температур столкнувшихся частиц не значительна, то происходит их слипание с образованием агломератов неправильных форм.

### Выводы

1. На основании экспериментальных исследований, направленных на исследование параметров формы титановых порошков, полученных для аддитивных машин электроэрозионным диспергированием металлоотходов сплава ОТ4 в воде, установлено, что электроэрозионные частицы имеют в основном сферическую форму.

2. Изучены технологические особенности получения отечественных титановых порошков сферической формы для аддитивных машин требуемого фракционного состава из отечественного сырья мелкими партиями при минимальных затратах энергии и минимальном уровне окружающей среде.

3. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему в области аддитивного производства изделий, связанную с необходимостью собственного отечественного производства сферических порошков требуемой марки мелкими партиями и требуемой зернистости в условиях санкционных ограничений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Быков, В. В. Направления использования аддитивных технологий при ремонте лесопромышленных и лесохозяйственных машин / В. В. Быков, М. И. Голубев, И. Г. Голубев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 3. – С. 26–30.
2. Фураев, В. В. Мировой опыт применения аддитивных технологий в производстве магнитопроводов электрических машин / В. В. Фураев // Вестник науки. – 2023. – Т. 4. – № 6 (63). – С. 971–976.
3. Хаба Э. Использование аддитивных технологий для изготовления деталей машин / Э. Хаба, В. А. Тимирязев // Горный информационно-аналитический бюллетень : науч.-техн. журнал. – 2018. – № 11. – С. 136–144.
4. Kheifetz, M. L. From information and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms // Advanced Materials and Technologies. – 2018. – № 1. – С. 22–35.
5. Пумпур, Е. В. Применение аддитивных технологий для ремонта гидропривода горных машин на примере шестеренного насоса НШ-32 / Е. В. Пумпур // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 311–314.
6. Ермаков, С. Б. Получение порошков для аддитивных машин методом плазменного распыления / С. Б. Ермаков, Е. Л. Гюлиханов // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 6 (120). – С. 29–41.
7. Разумов, Н. Г. Морфология порошка высоколегированной жаропрочной стали для машин аддитивного производства из стружки / Н. Г. Разумов, А. А. Попович, А. В. Григорьев, А. О. Силин, И. С. Гончаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2018. – № 11 (761). – С. 23–28.
8. Нефелов, И. С. Восстановление изношенных деталей машин при помощи дополнительных ремонтных деталей, изготовленных методами аддитивных технологий / И. С. Нефелов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 11. – С. 15–17.
9. Skvortsova S. V., German M. A., Spektor S. V. Structure and Properties of Alloy Ti–6Al–4V Samples Fabricated by 3D Printing // Russian Metallurgy (Metally), Pleiades Publishing, Ltd. – 2019 - Vol. 2019 - №9 - pp. 863-872
10. Konovalov S., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISi 310S steel microstructure after electron beam treatment // Materials. 2020. V. 13, No. 20. P. 1-13.
11. Geng Y., Konovalov, S.V., Chen X. Research status and application of the high-entropy and traditional alloys fabricated via the laser cladding // Progress in Physics of Metals. 2020. V. 21, No. 1. P. 26–45.
12. Nevskii S., Sarychev V., Konovalov S. et al. Wave instability on the interface coating/substrate material under heterogeneous plasma flows // Journal of Materials Research and Technology. 2020. V. 9, No. 1. P. 539-550.
13. Konovalov S., Osintsev K., Golubeva A. et al. Surface modification of Ti-based alloy by selective laser melting of Ni-based superalloy powder // Journal of Materials Research and Technology. 2020. V. 9, No. 4. P. 8796-8807.
14. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Elemental composition of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy // Russian metallurgy (Metally). 2017. T. 2017. № 12. P. 1083-1085.
15. Ageev E.V., Ugrimov A.S., Latypov R.A. Metallurgical features of the manufacture of hard-alloy powders by electroerosive dispersion of a T15K6 alloy in butanol // Russian metallurgy (Metally). 2016. T. 2016. № 12. P. 1155-1157.
16. Ageev E.V., Ageeva E.V., Latypov R.A. Investigation into the properties of electroerosive powders and hard alloy fabricated from them by isostatic pressing and sintering // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015. T. 56. № 1. P. 52-62.
17. Ageev E. V., Ageeva E. V. Properties of the Coatings Fabricated by Plasma-Jet Hard-Facing by Dispersed Mechanical Engineering Wastes // Russian Metallurgy (Metally). 2018. V. 2018, No. 6. P. 573–575.
18. Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Manufacture of cobalt–chromium powders by the electric discharge dispersion of wastes and their investigation // Russian metallurgy (Metally). 2018. T. 2018. № 12. P. 1177.
19. Ageev E.V., Latypov R.A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014. T. 55. № 6. P. 577.