

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 23. Выпуск 5.

УДК 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-5-161-171

Размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава в керосине¹

Е. В. Агеев, В. О. Поданов, А. Е. Агеева, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева

Агеев Евгений Викторович — доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Поданов Вадим Олегович — аспирант, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: vadim.podanov@yandex.ru

Агеева Анна Евгеньевна — студент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Кузовлева Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Аннотация

В настоящее время одной из основных проблем широкого применения в машиностроении вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава является высокая стоимость легирующих компонентов, входящих в его состав, вольфрама и титана. Помимо того, данный сплав обладает достаточно высокой температурой плавления, что затрудняет его переработку для вторичного использования. Одним из перспективных методов их переработки в порошки сферической формы является электроэрозионное диспергирование. К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения об использовании диспергированных электроэрозией частиц вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10 в качестве шихты для производства твердых сплавов и режущего инструмента из них. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью настоящей работы являлось проведение размерного анализа частиц твердосплавного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава в керосине.

Электроэрозионное диспергирование отходов вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10 осуществляли на экспериментальной установке (Патент РФ № 2449859). В результате воздействия кратковременных электрических разрядов образовывались твердосплавные частицы различной формы и размера. Размерные характеристики частиц порошка, полученного вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава, исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec».

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00123, <https://rscf.ru/project/22-29-00123/>

На основании проведенных экспериментальных исследований, установлено, что в порошке, полученном электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10 в керосине, содержится: 10% частиц с размером до 5,592 мкм; 20% частиц с размером до 9,871 мкм; 30% частиц с размером до 13,483 мкм; 40% частиц с размером до 19,451 мкм; 50% частиц с размером до 24,996 мкм; 60% частиц с размером до 29,194 мкм; 70% частиц с размером до 33,868 мкм; 80% частиц с размером до 42,686 мкм; 90% частиц с размером до 56,121 мкм; 99% частиц с размером до 64,469 мкм включительно. При этом частицы твердосплавного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового сплава Т5К10, имеют размеры от 0,5 до 100 мкм со средним объемным диаметром 27,092 мкм.

Ключевые слова: отходы вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава, электроэрозионное диспергирование, керосин, частицы порошка, размерные характеристики.

Библиография: 20 названий.

Для цитирования:

Е. В. Агеев, В. О. Поданов, А. Е. Агеева, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева. Размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава в керосине // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 5, с. 161–171.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 23. No. 5.

UDC 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-5-161-171

Dimensional analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-titanium-cobalt hard alloy in kerosene²

E. V. Ageev, V. O. Podanov, A. E. Ageeva, S. N. Kutepov, O. V. Kuzovleva

Ageev Evgeny Viktorovich — doctor of technical sciences, professor, Southwest State University (Kursk).

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Podanov Vadim Olegovich — postgraduate student, Southwest State University (Kursk).

e-mail: vadim.podanov@yandex.ru

Ageeva Anna Evgenievna — student, Southwest State University (Kursk).

e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru

Kutepov Sergey Nikolaevich — candidate of pedagogical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Kuzovleva Olga Vladimirovna — candidate of technical sciences, associate professor, Russian State University of Justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Abstract

²The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-00123, <https://rscf.ru/project/22-29-00123/>

Currently, one of the main problems of widespread use in mechanical engineering of tungsten-titanium-cobalt hard alloy is the high cost of alloying components that make up its composition, tungsten and titanium. In addition, this alloy has a sufficiently high melting point, which makes it difficult to recycle it for secondary use. One of the promising methods of their processing into spherical powders is electroerosive dispersion. To date, there is no complete information in the modern scientific and technical literature on the use of particles dispersed by electroerosion of tungsten-titanium-cobalt hard alloy of the T5K10 brand as a charge for the production of hard alloys and cutting tools from them. For these purposes, comprehensive theoretical and experimental studies are required.

The purpose of this work was to conduct a dimensional analysis of particles of carbide powder obtained by electroerosive dispersion of tungsten-titanium-cobalt hard alloy in kerosene.

Electroerosive dispersion of tungsten-titanium-cobalt hard alloy waste of the T5K10 brand was carried out on an experimental installation (RF Patent No. 2449859). As a result of exposure to short-term electrical discharges, carbide particles of various shapes and sizes were formed. The dimensional characteristics of the powder particles obtained from the tungsten-titanium-cobalt hard alloy were studied using the Analysette 22 NanoTec laser particle size analyzer.

Based on the conducted experimental studies, it was found that the powder obtained by electroerosive dispersion of tungsten-titanium-cobalt hard alloy T5K10 grade in kerosene contains: 10% of particles with a size up to 5,592 microns; 20% of particles with a size up to 9,871 microns; 30% of particles with a size up to 13,483 microns; 40% of particles with a size up to 19,451 microns; 50% of particles with a size up to 24,996 microns; 60% of particles with a size up to 29,194 microns; 70% of particles with a size up to 33,868 microns; 80% of particles with a size up to 42,686 microns; 90% of particles with a size up to 56,121 microns; 99% of particles with a size up to 64,469 microns inclusive. At the same time, the particles of the carbide powder obtained by electroerosive dispersion of the tungsten-titanium-cobalt alloy T5K10 have sizes from 0.5 to 100 microns with an average volumetric diameter of 27,092 microns.

Keywords: tungsten-titanium-cobalt hard alloy waste, electroerosive dispersion, kerosene, powder particles, dimensional characteristics.

Bibliography: 20 titles.

For citation:

E. V. Ageev, V. O. Podanov, A. E. Ageeva, S. N. Kutepov, O. V. Kuzovleva, 2022, "Dimensional analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-titanium-cobalt hard alloy in kerosene", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 23, no. 5, pp. 161–171.

1. Введение

Спеченные вольфрамсодержащие твердые сплавы обладают рядом весьма ценных свойств, благодаря которым их эффективно используют во многих областях техники. В производстве вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава используются дорогостоящие карбиды вольфрама WC и титана TiC, в качестве связующего материала — порошок металлического кобальта Co [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Одной из основных проблем использования вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава в настоящее время является высокая стоимость вольфрама и титана. Ввиду высокой температуры их плавления существует проблема их переработки для вторичного использования. Одним из перспективных методов переработки вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава порошки сферической формы является электроэрозионное диспергирование (ЭЭД).

Прочностные характеристики вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава во многом зависят от способа их получения. В настоящее время для производства вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава, т.е. консолидации порошков используют спекание (или горячее прессование), недостатком которой является наличие пор. Для получения спеченных изделий

с высокими механическими свойствами при повышенных температурах необходимо создание беспористой микроструктуры [7, 8, 9].

Современной альтернативой традиционному спеканию является SPS-синтез, при котором используется импульсы постоянного электрического тока, проходящего через графитовую матрицу, в которой находится образец. Процесс состоит из совместного воздействия температуры, осевого давления и электрического тока в присутствии электромагнитного поля (плазмы). Высокие локальные температуры между частицами испаряют загрязняющие вещества и оксиды на поверхности частиц до образования перемычки. Именно этот эффект с одновременным приложением осевого давления позволяет значительно снизить температуру спекания и продолжительность процесса, что в свою очередь способствует значительному уменьшению скорости роста зерна, в отличие от спекания без нагрузки или горячего прессования. SPS-синтез позволит получать конкурентноспособный высокотехнологичный продукт с повышенными физико-механическими свойствами [10, 11, 12, 13].

Решение вопросов, связанных с улучшением качества вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава, в полной мере касается так же качества порошковых материалов, используемых для их изготовления.

В связи с этим крайне актуальной задачей является комплексное изучение влияния исходного сырья на структуру и свойства сплавов, в частности, порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов сплава Т5К10 в процессе SPS-синтеза.

К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения об использовании диспергированных электроэрозией частиц сплава Т5К10 в качестве шихты для производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и режущего инструмента из них. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и повторное их использование при изготовлении режущего инструмента.

Работы в области исследования новых вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов ведутся в научных и высших образовательных учреждениях, таких как: НИТУ МИСиС, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, МПУ, ЮЗГУ, Институт материаловедения Хабаровского НЦ ДВО РАН и др. Однако в трудах ученых этих организаций не рассматриваются вопросы, касающиеся использования диспергированных электроэрозией частиц сплава Т5К10 в качестве шихты для производства вольфрамо-титано-кобальтовых сплавов и режущего инструмента из них.

Целью настоящей работы являлось проведение размерного анализа частиц твердосплавного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава в керосине.

2. Основной текст статьи

Электроэрозионное диспергирование отходов вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10 осуществляли на экспериментальной установке (Патент РФ № 2449859) [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] в керосине. В результате воздействия кратковременных электрических разрядов образовывались твердосплавные частицы различной формы и размера.

Блок-схема процесса электроэрозионного диспергирования отходов вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10 представлена на рисунке 1.

В результате воздействия кратковременных электрических разрядов в рабочей жидкости (керосине) образовывались частицы твердосплавного порошка различного размера.

Размерные характеристики частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10, исследовали на лазер-

ном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» (Германия). Блок-схема методики исследования гранулометрического состава представлена на рисунке 2.

Лазерный анализатор размеров частиц «Analysette 22 NanoTec plus» определяет распределение по размерам частиц в суспензиях и эмульсиях. По сравнению с «классическими» методами измерения — рассевом, седиментацией либо анализом по изображению, лазерная дифракция обладает рядом важных преимуществ, таких как краткое время анализа, хорошая воспроизводимость и точность, простая калибровка, большой диапазон измерений и высокая универсальность.

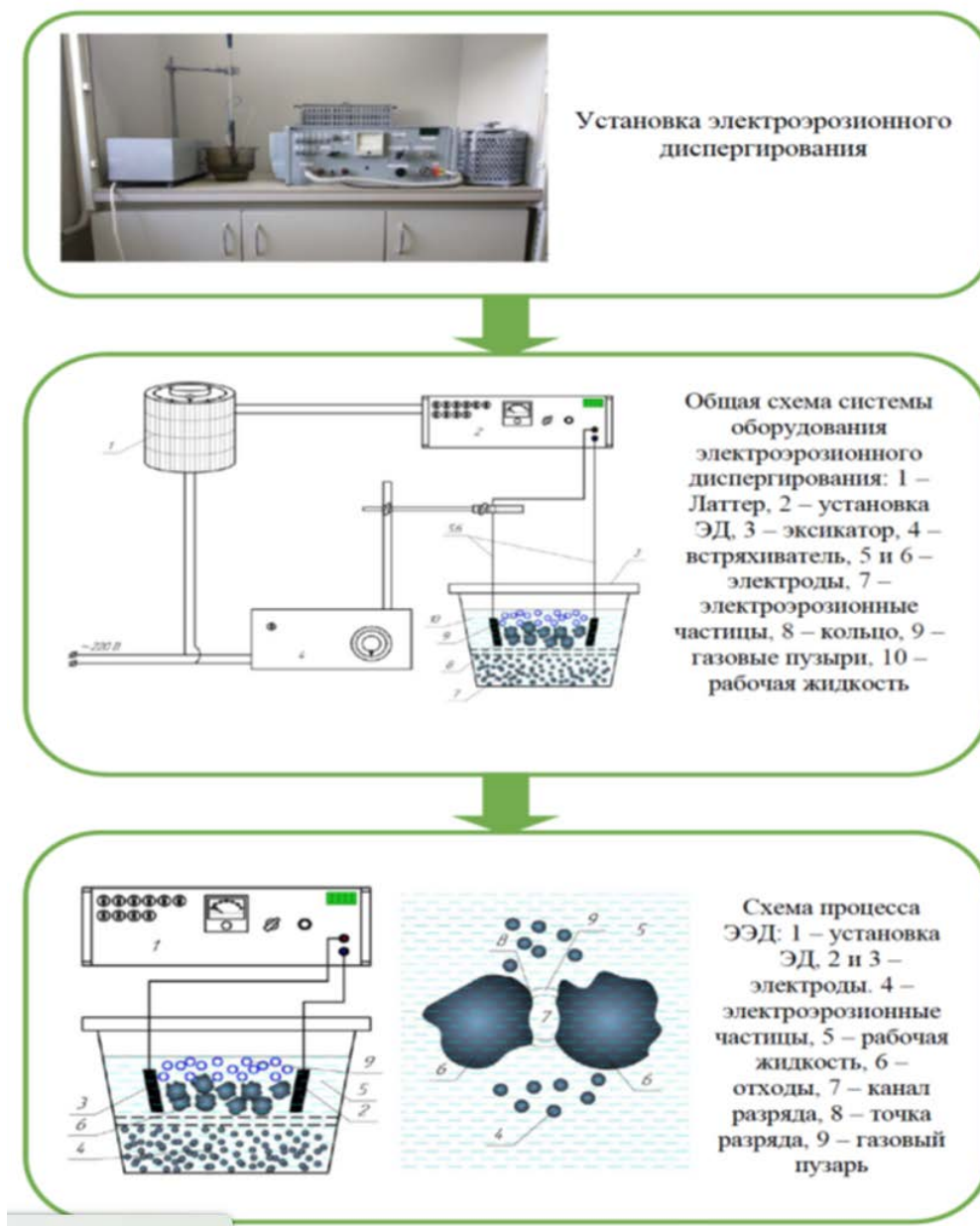


Рис 1: Блок-схема процесса электродиспергирования отходов вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава

Диапазон измерений «Analysette 22 NanoTec plus» составляет от 0,01 до 2000 мкм. В анализаторах, определяющих распределение частиц по размерам посредством лазерной дифракции, используется физический принцип рассеяния электромагнитных волн. Конструкция состоит

из лазера, через измерительную ячейку направленного на детектор. При помощи диспергирующего устройства частицы подают в измерительную ячейку и проходят сквозь лазерный луч. Свет, рассеянный пропорционально размеру частиц, посредством линзы фокусируется на детектор. По распределению рассеянного света при помощи комплексной математики рассчитывают распределение частиц по их размерам. В результате получают объемные доли, соответствующие эквивалентным диаметрам при лазерной дифракции. Благодаря встроенной ультразвуковой ванне (объем около 500 мл, энергия и частота ультразвука 80 Вт/36 кГц), даже труднодиспергируемые пробы могут анализироваться без применения дополнительного оборудования. Цифровой ультразвуковой генератор всегда поддерживает установленную мощность на оптимальном и постоянном уровне. Нижний предел чувствительности при малых количествах мелких и крупных частиц в распределениях их по размерам (в пределах диапазона измерений) — 3%. Воспроизводимость согласно ISO 13320-1 $d_{50} \leq 1\%$.

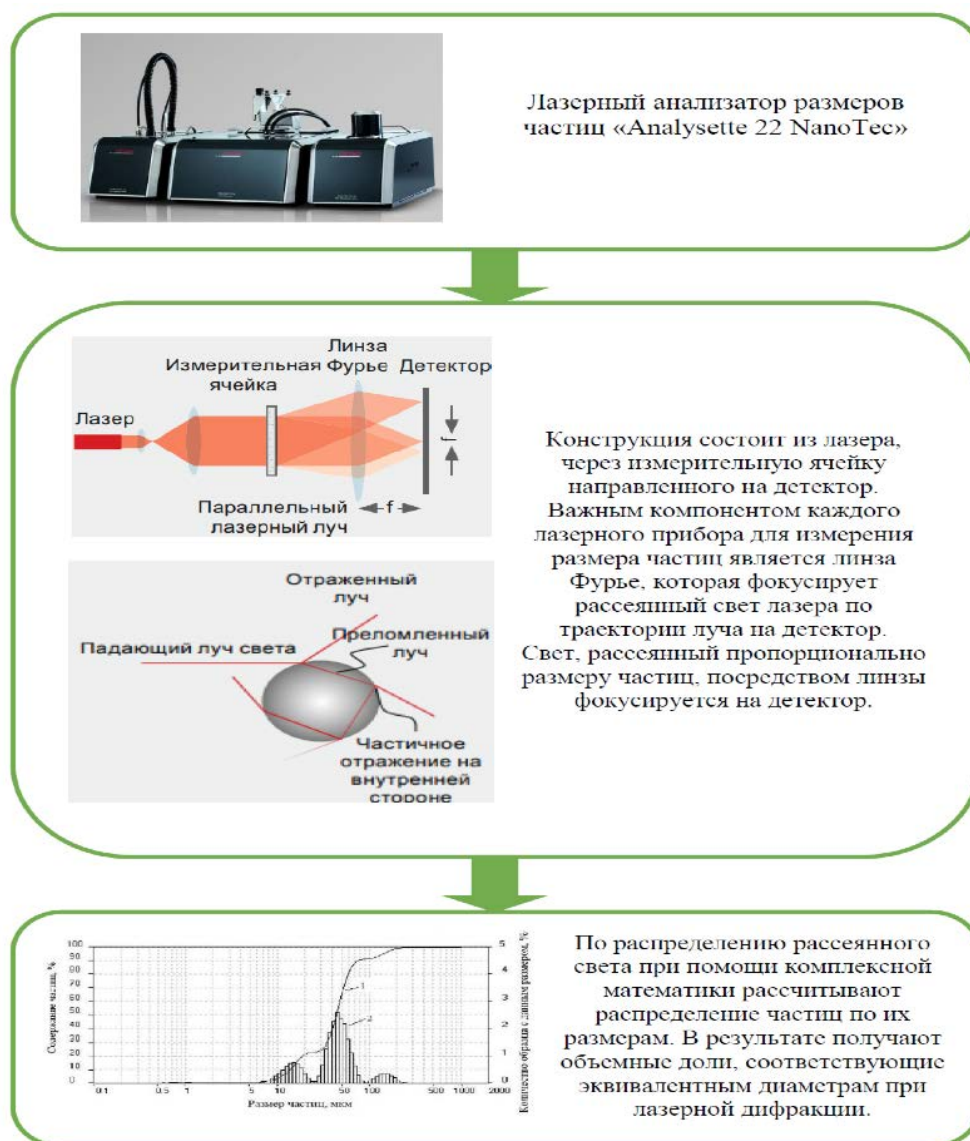


Рис 2: Блок-схема методики определения среднего размера частиц твердосплавного порошка

3. Результаты и их обсуждение

Экспериментально установлено (рис. 3), что частицы порошка, полученного электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового сплава Т5К10, имеют размеры от 0,5 до 100 мкм со средним объемным диаметром 27,092 мкм.

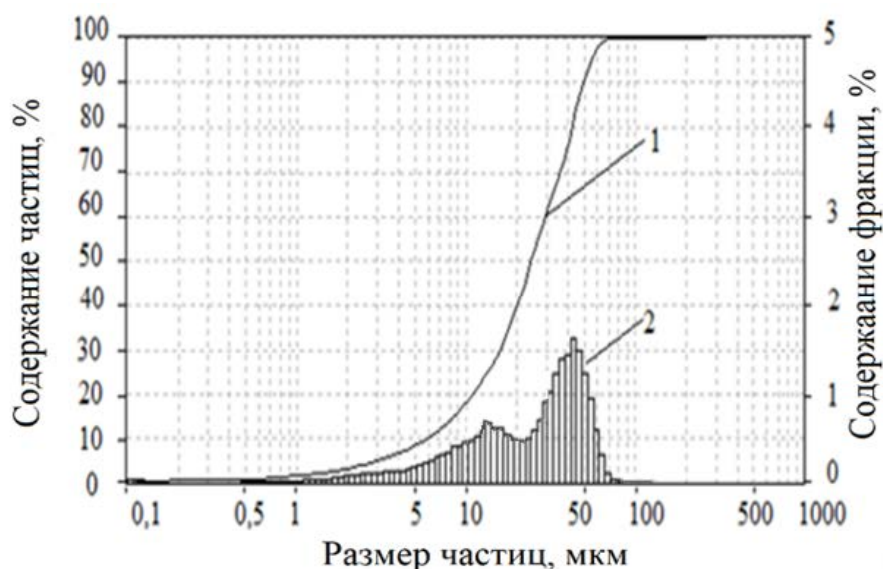


Рис 3: Интегральная кривая (1) и гистограмма (2) распределения по размерам частиц твердосплавного порошка, полученного в керосине

Отмечены особенности формирования фракционного состава частиц порошка в процессе электроэрозионной металлургии вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10, а именно наличие двух экстремумов размеров частиц 15 мкм и 40 мкм: мелкая фракция (0,5 ... 25,0 мкм) образуется за счет конденсации парообразной фазы и крупная фракция (25,0 ... 100,0 мкм) образуется за счет конденсации жидкой фазы.

Отмечено, что смещение экстремумов размеров частиц, образующихся при кристаллизации парообразной и жидкой фаз, определяется электрическими параметрами работы установки: напряжением на электродах, емкостью разрядных конденсаторов и частотой следования импульсов.

Установлена зависимость, показывающая, что средний размер частиц увеличивается с повышением энергии импульса. Получены зависимости, позволяющие выполнить расчетную оценку фракционного состава диспергируемого материала, получаемого в условиях действия электроконтактных тепловых источников.

Размерные характеристики частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10, представлены в таблице 1.

Таблица 1: Размерные характеристики частиц твердосплавного порошка

Размерная характеристика	Величина
D10, мкм	5,592
D20, мкм	9,871
D30, мкм	13,483
D40, мкм	19,451
D50, мкм	24,996

D60, мкм	29,194
D70, мкм	33,868
D80, мкм	42,686
D90, мкм	56,121
D99, мкм	64,469
Средний объемный диаметр, мкм	27,092

Из представленных данных в таблице 1 видно, что в порошке, полученном электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10 в керосине, содержится: 10% частиц с размером до 5,592 мкм; 20% частиц с размером до 9,871 мкм; 30% частиц с размером до 13,483 мкм; 40% частиц с размером до 19,451 мкм; 50% частиц с размером до 24,996 мкм; 60% частиц с размером до 29,194 мкм; 70% частиц с размером до 33,868 мкм; 80% частиц с размером до 42,686 мкм; 90% частиц с размером до 56,121 мкм; 99% частиц с размером до 64,469 мкм включительно.

4. Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на проведение размерного анализа частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава в керосине, показана высокая эффективность применения технологии электроэрозионного диспергирования, которая обеспечивает при низких затратах электроэнергии получение твердосплавных порошков, пригодных для практического применения. Отмечены особенности формирования фракционного состава частиц порошка в процессе электроэрозионной металлургии вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплава марки Т5К10, а именно наличие двух экстремумов размеров частиц 15 мкм и 40 мкм: мелкая фракция (0,5 ... 25,0 мкм) образуется за счет конденсации парообразной фазы и крупная фракция (25,0 ... 100,0 мкм) образуется за счет конденсации жидкой фазы.

Экспериментально установлено, что частицы порошка, полученного электроэрозионным диспергированием вольфрамо-титано-кобальтового сплава Т5К10, имеют размеры от 0,5 до 100 мкм со средним объемным диаметром 27,092 мкм.

Помимо того, установлено, что смещение экстремумов размеров частиц, образующихся при кристаллизации парообразной и жидкой фаз, определяется электрическими параметрами работы установки: напряжением на электродах, емкостью разрядных конденсаторов и частотой следования импульсов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев Е.Н., Замулаева Е.И., Зайцев А.А., Коняшин И.Ю., Левашов Е.А. Структура и свойства крупнозернистых твердых сплавов WC-Co с особо однородной микроструктурой // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2019. № 4. С. 70-78.
2. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния температурных полей нагрева при непрерывной лазерной обработке на эксплуатационные свойства пластин твердого сплава Т15К6 // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 76-84.
3. Самотугин С.С., Кудинова Е.В., Христенко О.А., Беляковский В.П., Шибистая Я.Н. Выбор оптимальных режимов плазменной обработки инструмента из твердых сплавов // Технология машиностроения. 2018. № 7. С. 30-34.

4. Дворник М.И., Михайленко Е.А. Использование недостатка углерода для создания наноструктурного градиентного твердого сплава // Бюллетень научных сообщений. 2018. № 23. С. 22-27.
5. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В., Игнатьюк В.Д. Термическая обработка непережигаемых пластин из твердого сплава Т15К6 непрерывным лазерным излучением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 1 (169). С. 26-30.
6. Быстров В.А. Эффективность упрочнения твердым сплавом сменных деталей металлургических агрегатов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 12. С. 939-947.
7. 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. Т. 2017. № 12. С. 1083-1085.
8. 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. Т. 2016. № 12. С. 1155-1157.
9. 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. Т. 56. № 1. С. 52-62.
10. Кочергин С.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Д.Т. Конечно-элементное моделирование процесса искрового плазменного спекания режущих пластин // СТИН. 2015. № 10. С. 28-32.
11. Смирнов А.В., Юшин Д.И., Кузнецов В.А. Моделирование искрового плазменного спекания: цели, задачи, проблемы и пути их решения // Молодой ученый. 2016. № 25 (129). С. 66-72.
12. Забелин Д.А., Чайникова А.С., Качаев А.А., Осин И.В., Гращенков Д.В. Синтез, структура и свойства керамики на основе оксинитрида алюминия (AlON), полученной методом искрового плазменного спекания // Труды ВИАМ. 2019. № 6 (78). С. 13-19.
13. Пристинский Ю.О., Перетягин Н.Ю., Кузнецова Е.В., Перетягин П.Ю. Сравнение механических свойств твердых сплавов ВК6, полученных традиционным методом и искровым плазменным спеканием // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 51-54.
14. Агеев Е.В., Латыпов Р.А., Агеева Е.В. Исследование свойств электроэрозионных порошков и твердого сплава, полученного из них изостатическим прессованием и спеканием // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2014. – №6. – С. 51–55.
15. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию // Вестник машиностроения. 2014. №10. С. 66–68.
16. Агеева Е.В., Агеев Е.В., Воробьев Е.А. Рентгеноспектральный микроанализ порошка, полученного из отходов быстрорежущей стали электроэрозионным диспергированием в керосине // Вестник машиностроения. 2014. №11. С. 71–72.
17. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Исследование формы и морфологии электроэрозионных медных порошков, полученных из отходов // Вестник машиностроения. 2014. №8. С. 73–75.

18. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Исследование распределения микрочастиц по размерам в порошках, полученных электроэрозионным диспергированием медных отходов // Вестник машиностроения. 2014. №9. С. 63–64.
19. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Воробьев Е.А. Гранулометрический и фазовый составы порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в керосине // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. №4(112). С. 11–14.
20. Агеева Е.В., Агеев Е.В., Воробьев Е.А. Анализ формы и морфологии частиц порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в керосине // Вестник машиностроения. 2015. №7. С. 72–73.

REFERENCES

1. Avdeenko E.N., Zamulaeva E.I., Zaitsev A.A., Konyashin I.Yu., Levashov E.A. 2019, “Structure and properties of coarse-grained WC-Co hard alloys with a particularly homogeneous microstructure”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh uchebnykh zavedeniy, Non-ferrous metallurgy*. No. 4. pp. 70-78.
2. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. 2018, “Investigation of the influence of temperature fields of heating during continuous laser processing on the operational properties of T15K6 hard alloy plates”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh uchebnykh zavedenii. Powder metallurgy and functional coatings*. No. 2. pp. 76-84.
3. Samotugin S.S., Kudinova E.V., Khristenko O.A., Belyakovsky V.P., Shibistaya Ya.N. 2018, “The choice of optimal modes of plasma processing of tools made of hard alloys”, *Technology of mechanical engineering*. No. 7. pp. 30-34.
4. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A. 2018, “The use of carbon deficiency to create a nanostructured gradient hard alloy”, *Bulletin of scientific communications*. No. 23. pp. 22-27.
5. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V., Ignatyuk V.D. 2019, “Heat treatment of non-sharpenable plates made of T15K6 hard alloy by continuous laser radiation”, *Hardening technologies and coatings*. Vol. 15. No. 1 (169). pp. 26-30.
6. Bystrov V.A. 2018, “Efficiency of hardening with a hard alloy of replaceable parts of metallurgical aggregates”, *Izvestia of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*. Vol. 61. No. 12. pp. 939-947.
7. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. 2017, “Elemental composition of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy”, *Russian metallurgy (Metally)*. Vol. 2017. No. 12. pp. 1083-1085.
8. Ageev E.V., Ugrimov A.S., Latypov R.A. 2016, “Metallurgical features of the manufacture of hard-alloy powders by electroerosive dispersion of a T15K6 alloy in butanol”, *Russian metallurgy (Metally)*. Vol. 2016. No. 12. pp. 1155-1157.
9. Ageev E.V., Ageeva E.V., Latypov R.A. 2015, “Investigation into the properties of electroerosive powders and hard alloy fabricated from them by isostatic pressing and sintering”, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. T. 56. No. 1. pp. 52-62.
10. Kochergin S.A., Morgunov Yu.A., Saushkin, D.T. “Finite element modeling of the process of spark plasma sintering inserts”, *STIN*. No. 10. pp. 28-32.

11. Smirnov A.V., Yushin D.I., Kuznetsov V.A. 2016, "Modeling of spark plasma sintering: goals, objectives, problems and solutions", *Young scientist*. No. 25 (129). pp. 66-72.
12. Zabelin D.A., Chaynikova A.S., Kachaev A.A., Osin I.V., Grashchenkov D.V. 2019, "Synthesis, structure and properties of ceramics based on aluminum oxynitride (ALON) obtained by spark plasma sintering", *Proceedings of VIAM*. No. 6 (78). pp. 13-19.
13. Pristinsky Yu.O., Peretyagin N.Yu., Kuznetsova E.V., Peretyagin P.Yu. 2019, "Comparison of mechanical properties of vk6 hard alloys obtained by the traditional method and spark plasma sintering", *Bulletin of Mechanical Engineering*. No. 9. pp. 51-54.
14. Ageev E.V., Latypov R.A., Ageeva E.V. 2014, "Investigation of the properties of electroerosive powders and hard alloy obtained from them by isostatic pressing and sintering", *News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy*. No.6. pp. 51-55.
15. Ageeva E.V., Horyakova N.M., Ageev E.V. 2014, "Morphology and elemental composition of copper electroerosive powders suitable for sintering", *Bulletin of Mechanical Engineering*. No. 10. pp. 66-68.
16. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorobyev E.A. 2014, "X-ray spectral microanalysis of powder obtained from high-speed steel waste by electroerosive dispersion in kerosene", *Vestnik mashinostroeniya*. No.11. pp. 71-72.
17. Ageeva E.V., Horyakova N.M., Ageev E.V. 2014, "Investigation of the form and morphology of electroerosive copper powders obtained from waste", *Vestnik mashinostroeniya*. No.8. pp. 73-75.
18. Ageeva E.V., Horyakova N.M., Ageev E.V. 2014, "Investigation of the size distribution of microparticles in powders obtained by electroerosive dispersion of copper waste", *Vestnik Mashinostroeniya*. No. 9. pp. 63-64.
19. Ageev E.V., Ageeva E.V., Vorobiev E.A. 2014, "Particle size and phase composition of the powder obtained from tungsten-containing wastes tool materials by electroerosion dispersion in kerosene", *Strengthening technologies and coatings*. №4(112). pp. 11-14.
20. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorob'ev E.A. 2015, "Analysis of the shape and morphology of the powder particles obtained from tungsten-containing wastes by electroerosion dispersion in kerosene", *Journal of mechanical engineering*. No. 7. pp. 72-73.

Получено: 21.09.2022

Принято в печать: 22.12.2022