ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК
Том 21. Выпуск 4.

УДК 621.762.227 DOI 10.22405/2226-8383-2020-21-4-314-326

# Разработка научных и технологических основ нового экологически чистого и безотходного процесса измельчения токопроводящих отходов в порошки микро- и нанофракций

Е. В. Агеева, Е. В. Агеев, О. А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева

**Екатерина Владимировна Агеева** — кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).
*e-mail: ageeva-ev@yandex.ru*
**Евгений Викторович Агеев** — доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).
*e-mail: ageev_ev@mail.ru*
**Александр Евгеньевич Гвоздев** — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).
*e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru*
**Ольга Владимировна Кузовлева** — кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).
*e-mail: kusovleva@yandex.ru*

**Аннотация**

В работе представлена реализация технологии электроэрозионного измельчения на примере отходов твердых сплавов. Показано, что мощность электроконтактных тепловых источников может быть достаточной для реализации процесса электроэрозионного диспергирования. Получены зависимости, позволяющие выполнить расчетную оценку фракционного состава порошкового материала, получаемого в условиях действия электроконтактных тепловых источников.

*Ключевые слова:* металлоотходы, мощность тепловых источников, порошковый материал, размер частиц, электроэрозионное диспергирование.

*Библиография:* 26 названий.

**Для цитирования:**
Е. В. Агеева, Е. В. Агеев, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева. Разработка научных и технологических основ нового экологически чистого и безотходного процесса измельчения токопроводящих отходов в порошки микро- и нанофракций // Чебышевский сборник, 2020, т. 21, вып. 4, с. 314–326.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK
Vol. 21. No. 4.

UDC 621.762.227 DOI 10.22405/2226-8383-2020-21-4-314-326

# Development of scientific and technological foundations for a new environmentally friendly and waste-free process for grinding conductive waste into micro- and nanofractions powders

E. V. Ageeva, E. V. Ageev, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva

**Ekaterina Vladimirovna Ageeva** — candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of materials and transport technology, Southwestern State University (Kursk).
*e-mail: ageeva-ev@yandex.ru*
**Yevgeniy Viktorovich Ageev** — doctor of technical Sciences, Professor of the Department of automobiles and automobile economy, Southwestern State University (Kursk).
*e-mail: ageev_ev@mail.ru*
**Aleksander Evgenyevich Gvozdev** — doctor of engineering, Professor, Tula State Pedagogical University L.N. Tolstoy (Tula).
*e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru*
**Olga Vladimirovna Kuzovleva** — candidate of technical Sciences, docent, Russian State University of justice (Moscow).
*e-mail: kusovleva@yandex.ru*

**Abstract**

The paper presents the implementation of the technology of electroerosive grinding on the example of solid alloy waste. It is shown that the power of electric contact heat sources can be sufficient for the implementation of the process of electroerosive dispersion. Dependences are obtained that allow us to perform a calculated estimation of the fractional composition of the powder material obtained under the action of electric contact heat sources.

*Keywords:* metal waste, power of heat sources, powder material, particle size, electroerosive dispersion.

*Bibliography:* 26 titles.

**For citation:**
E. V. Ageeva, E. V. Ageev, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, 2020, "Development of scientific and technological foundations for a new environmentally friendly and waste-free process for grinding conductive waste into micro- and nanofractions powders", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 21, no. 4, pp. 314–326.

## 1. Введение

Первые исследования по применению явления электроэрозии для получения нанопорошков металлов относятся к 40-м годам прошлого столетия. Изобретенный в 1943 г. Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко метод электроискровой обработки впоследствии разделился на два отдельных – электроэрозионная обработка и электроискровое легирование. Однако возможность создания производительной технологии получения дисперсных нанопорошков металлов и их соединений появилась только в последние десятилетия в результате исследований электроэрозии в

межэлектродном промежутке, заполненном свободно соприкасающимися гранулами металла и диэлектрической рабочей жидкостью [1, 2, 3, 4, 5, 6].

В нашей стране и за рубежом такая технология вызвала первоочередной интерес для получения химически чистой окиси алюминия. В ряде исследовательских работ было установлено, что методом электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) можно получать нанопорошки практически любых металлов и их проводящих соединений. Отмечается, что нанопорошки, получаемые этим методом, имеют сферическую форму частиц размером от 0,001 до 100 мкм. Причем, изменяя электрические параметры процесса диспергирования, можно управлять шириной и смещением интервала размера частиц [7, 8, 9, 10, 11].

## 2. Основной текст статьи

В зависимости от среды диспергирования можно получать как химически чистые нанопорошки металлов, так и соединения металлов с элементами среды. В частности, диспергирование металлов в воде является перспективным способом получения нанопорошков оксидов и гидроксидов металла, а диспергирование в углеродсодержащих жидкостях приводит к большому процентному выходу соединения металла с углеродом. Используя различные способы очистки, можно добиваться высокого процента выхода чистого металлического порошка и в случае взаимодействия металла со средой [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Схема данного процесса представлена на рис. 1.

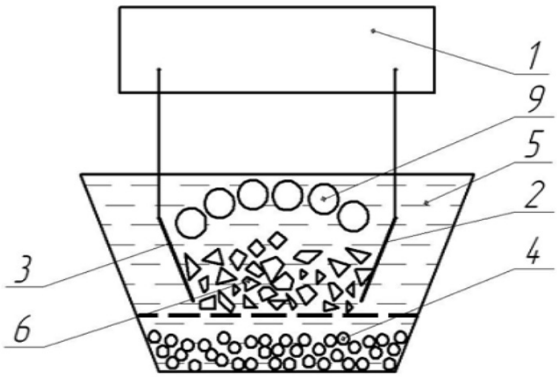


Рис. 1: Схема процесса электроэрозионного диспергирования: 1 – генератор импульсов, 2, 3 – электроды, 4 – полученный порошок, 5 – рабочая жидкость, 6 – диспергируемый материал.

Диспергируемый материал 6 размещается между электродами 2 и 3, подключенным к генератору импульсов 1. Тепловая мощность электрических импульсов тока расходуется на плавление и испарение диспергируемого материала. Металлический пар и расплавленные частицы конденсируются в рабочей жидкости 5 и осаждаются в виде порошкового материала 4 различной фракции [19, 20, 21, 22].

Для описания механизма электроэрозионного диспергирования материалов применительно к различным технологическим процесам в настоящее время широко применяется тепловая теория, согласно которой разрушение материала происходит в результате его высокоскоростного нагрева до температур плавления и испарения. В работе [23] применительно к процессу электроэрозионной обработки металлов выделены три разновидности процессов между электродами. В первом случае под влиянием электрического поля между электродами происходит пробой промежутка. После пробоя капли расплавленного металла и его пары беспрепятственно удаляются из зоны разрядов. Разрушение металла происходит исключительно за счет действия поверхностного теплового источника. Во втором случае, при выбросе металла

электроды замыкаются расплавленным металлом. При этом, если достаточно энергии электрического импульса, металлический мостик взрывообразно разрушается при его перегреве джоулевым теплом и межэлектродный промежуток освобождается от металла. В третьем случае к моменту прохождения импульса тока электроды уже соприкасаются друг с другом. При прохождении импульса тока достаточной мощности происходит перегрев и разрушение контактирующих микровыступов джоулевым теплом с последующим возможным образованием разрядного канала. Следует также отметить, что возможность диспергирования компактного металла в результате его перегрева джоулевым теплом показана, например, в работах [24, 25].

Применительно к рассматриваемому процессу электроэрозионного диспергирования реализация первого и второго случаев, предусматривающих электрический пробой межэлектродного промежутка, представляется мало вероятной из-за шунтирования импульсов электрического тока в цепи электрод – объемы диспергируемого металла – электрод. Представляется, что именно третий вариант нагрева с предварительным коротким замыканием и последующим возможным искрообразованием при размыкании электрической цепи является наиболее вероятным механизмом диспергирования.

Целью настоящей работы являлась оценка эффективности мощности тепловыделения на контактных сопротивлениях применительно к процессу электроэрозионного диспергирования металлотходов.

В данной работе выполнена расчетная оценка эффективности мощности тепловыделения на контактных сопротивлениях применительно к процессу электроэрозионного диспергирования без учета последующего искрообразования. При этом ограничились учетом только сопротивления стягивания [26].

## 3. Результаты и их обсуждение

Была графически представлена схема, представленная на рис. 2.

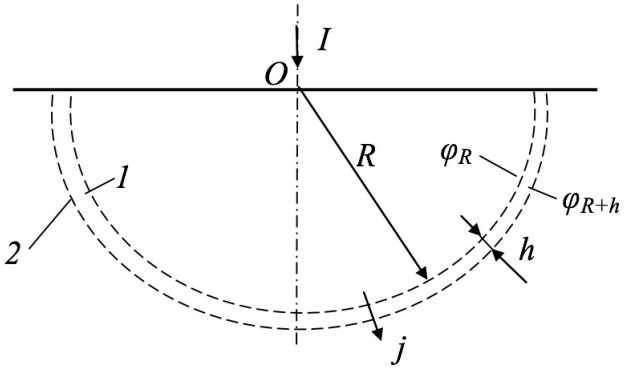


Рис. 2: Схема для расчета нагрева зоны контакта.

Считаем, что электрический контакт возникает в области точки $O$, причем площадь контакта пренебрежимо мала по сравнению с размерами контактирующих частиц. Предполагаем также, что эквипотенциальные поверхности 1 и 2 с потенциалами $\varphi_R$ и $\varphi_{R+h}$, удаленные друг от друга на расстоянии $h$, представляют собой полусферы. Из данного допущения следует, что плотность тока $j$ по поверхности сферы с произвольным радиусом $R$ постоянна. Тогда приращение теплоты $dQ$, выделившееся в объеме частицы, ограниченной эквипотенциальными поверхностями 1 и 2 за время $dt$ составит:

$$dQ = d(I^2\omega t), \tag{1}$$

где $\omega$ – электрическое сопротивление металла частицы, ограниченного эквипотенциальными поверхностями 1 и 2. Полагая, что $R >> h$, получим:

$$\omega = \rho \frac{h}{2\pi R^2}, \tag{2}$$

где $\rho$ – удельное электрическое сопротивление.

Учтем также зависимость от температуры нагрева $T$:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T), \tag{3}$$

где $\rho_0$ – удельное электрическое сопротивление при начальной температуре, $\alpha$ – температурный коэффициент электрического сопротивления.

Приняв также допущение, что $I = const$, и подставив (2) и (3) в (1), получили:

$$dQ = I^2 \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{h}{2\pi R^2} dt. \tag{4}$$

Учитывая кратковременность действия импульсов тока диспергирования, а также интенсивное охлаждение частиц рабочей средой, приняли, что возникающее в частицах поле температур определяется исключительно полем мощности тепловыделения, при этом процессы теплопередачи на распределение температур в частице влияния не оказывают.

С другой стороны можно записать

$$dQ = mcdT, \tag{5}$$

где $m$ – масса металла, расположенного между эквипотенциальными поверхностями 1 и 2, $c$ – теплоемкость.

Приравнивая правые части уравнений (4) и (5) получили

$$mcdT = I^2 \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{h}{2\pi R^2} dt. \tag{6}$$

На основе геометрических построений из рисунка 1 найдем, что

$$m = 2\pi R^2 h \gamma, \tag{7}$$

где $\gamma$ – плотность металла.

Подставив (7) в (6), получили:

$$2\pi R^2 h \gamma c dT = I^2 \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{h}{2\pi R^2} dt. \tag{8}$$

Перепишем уравнение (8) в виде:

$$\frac{dT}{(1 + \alpha T)} = \frac{I^2 \rho_0}{4\pi^2 R^4 \gamma c} dt. \tag{9}$$

Интегрируя выражение (9), получили:

$$t = \frac{4\pi^2 R^4 c}{I^2 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha T) + B, \tag{10}$$

где $B$ – постоянная интегрирования.

При $T < T_{пл}$ (где $T_{пл}$ – температура плавления) $B = 0$ и выражение (10) примет вид:

$$t = \frac{4\pi^2 R^4 c}{I^2 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha T). \tag{11}$$

В случае полного расплавления нагреваемого объема металла необходимо учесть скрытую теплоту плавления. В этом случае:

$$B = \frac{4\pi^2 R^4 \lambda}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{пл})}, \tag{12}$$

где $\lambda$ – удельная теплота плавления.

С учетом (10) и (12) время нагрева выделенной сферы с радиусом $R$ до температуры плавления составит:

$$t_{пл} = \frac{4\pi^2 R^4 c}{I^2 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha T_{пл}) + \frac{4\pi^2 R^4 \lambda}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{пл})}. \tag{13}$$

Для случая нагрева металла до его испарения:

$$B = \frac{4\pi^2 R^4 \lambda}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{пл})} + \frac{4\pi^2 R^4 L}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{исп})}. \tag{14}$$

Продолжительность $t_{исп}$ нагрева металла до его испарения на основании (10) и (14) составит:

$$t_{исп} = \frac{4\pi^2 R^4 c}{I^2 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha T_{исп}) + \frac{4\pi^2 R^4 \lambda}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{пл})} + \frac{4\pi^2 R^4 L}{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T_{исп})}, \tag{15}$$

где $L$ – удельная теплота парообразования.

Из выражений (13) и (15) можно получить значения радиусов $R_{пл}$ и $R_{исп}$ полусфер, соответствующих границам плавления и испарения металла при произвольной продолжительности нагрева $t$:

$$R_{пл} = \left(\frac{I}{2\pi}\right)^{0,5} \left(\frac{\rho_0 \alpha t}{c \ln(1 + \alpha T_{пл}) + \dfrac{\lambda}{1 + \alpha T_{пл}}}\right)^{0,25}, \tag{16}$$

$$R_{исп} = \left(\frac{I}{2\pi}\right)^{0,5} \left(\frac{\rho_0 \alpha t}{c \ln(1 + \alpha T_{исп}) + \dfrac{\lambda}{1 + \alpha T_{пл}} + \dfrac{L}{1 + \alpha T_{исп}}}\right)^{0,25}. \tag{17}$$

Объем материала, расположенный на удалении от контакта на расстояние $R < R_{исп}$, при нагреве превращаются в пар. Объем материала, расположенный на удалении от контакта на расстояние $R < R_{пл}$, при нагреве переходит как в жидкое, так и парообразное состояния.

Объем испаренного металла вокруг одного контакта найдем как:

$$V_{исп} = \frac{4}{3}\pi R_{исп}^3. \tag{18}$$

Суммарный объем испаренного и расплавленного металла соответственно составит:

$$V_{пл} = \frac{4}{3}\pi R_{пл}^3. \tag{19}$$

Подставив в (18) и (19) зависимости (16) и (17), получили:

$$V_{исп} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{I}{2\pi}\right)^{1,5} \left(\frac{\rho_0 \alpha t}{c \ln(1 + \alpha T_{исп}) + \dfrac{\lambda}{1 + \alpha T_{пл}} + \dfrac{L}{1 + \alpha T_{исп}}}\right)^{0,75}. \tag{20}$$

и

$$V_{пл} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{I}{2\pi}\right)^{1,5} \left(\frac{\rho_0 \alpha t}{c\ln(1+\alpha T_{пл}) + \dfrac{\lambda}{1+\alpha T_{пл}}}\right)^{0,75} \tag{21}$$

Доля парообразной фазы в диспергированной объеме составит:

$$\mu = \frac{V_{исп}}{V_{пл}}. \tag{22}$$

Подставив в (22) зависимости (20) и (21), получили:

$$\mu = \left(\frac{c\ln(1+\alpha T_{пл}) + \dfrac{\lambda}{1+\alpha T_{пл}}}{c\ln(1+\alpha T_{исп}) + \dfrac{\lambda}{1+\alpha T_{пл}} + \dfrac{L}{1+\alpha T_{исп}}}\right)^{0,75}. \tag{23}$$

Зависимость (23) показывает, что при электроконтактном способе нагрева соотношение объемов, образуемых при диспергировании парообразной и жидкой фаз, определяется теплофизическими свойствами диспергируемого материала.

Рассмотрим в качестве примера диспергирование меди. Приняв, что $T_{пл} = 1083°\ C$, $T_{исп} = 2560°\ C$, $\alpha = 0,01\ldots0,03$ *град*$^{-1}$ (в диапазоне $T = 0\ldots T_{исп}$ °$C$), $c = 400$ *Дж/кг · град*, $\lambda = 213$ *Дж/кг*, $L = 4800$ *Дж/кг*, по зависимости (23) получили $\mu \approx 0,1$. Таким образом, около 10% диспергируемого материала должно образовываться при конденсации паров металла. На основе зависимостей (16) и (17) выполнили расчетную оценку размеров частиц, получаемых из парообразной и жидкой фаз в предположении, что за один импульс тока на одном контакте образуется одна шарообразная частица из парообразной фазы диаметром

$$D_п = 2R_{исп}, \tag{24}$$

и одна шарообразная частица из жидкой фазы диаметром

$$D_{ж} = 2(R_{пл} - R_{исп}). \tag{25}$$

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

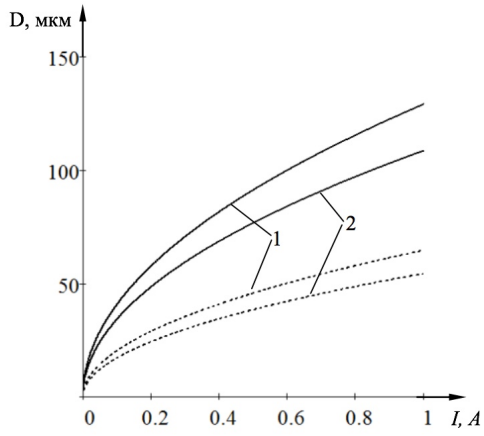


Рис. 3: Изменение размеров частиц в зависимости от силы тока: 1 – для $t = 0,01$ с, 2 – для $t = 0,005$ с, – из жидкой фазы, ...– из парообразной фазы.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3 показывает, что размер частиц увеличивается как с повышением силы тока, так и с увеличением продолжительности импульса. Размеры частиц, образованных из парообразной и жидкой фаз резко различается, что объясняет наличие нескольких экстремумов наиболее вероятных размеров частиц в экспериментально определенном фракционном составе полученного порошкового материала (рис. 4 и 5).

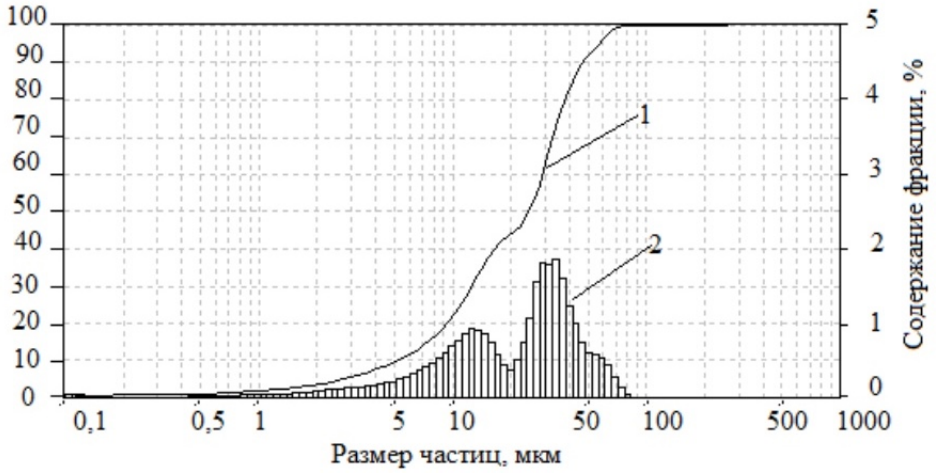


Рис. 4: Распределение по размерам частиц твердого сплава, полученных электроэрозионным диспергированием: 1 – интегральная кривая, 2 – гистограмма.

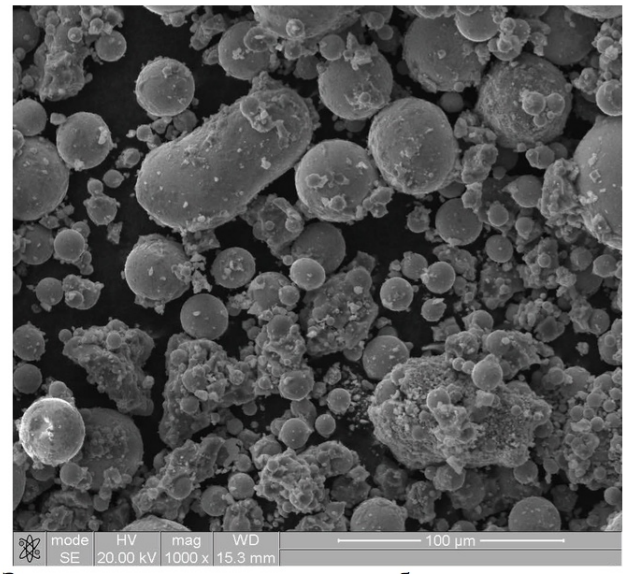


Рис. 5: Электронно-микроскопическое изображение частиц твердого сплава, полученных электроэрозионным диспергированием.

## 4. Заключение

Мощность электроконтактных тепловых источников может быть достаточной для реализации процесса электроэрозионного диспергирования.

Получены зависимости, позволяющие выполнить расчетную оценку фракционного состава порошкового материала, получаемого в условиях действия электроконтактных тепловых источников.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ


1. Агеев Е. В., Гадалов В. Н., Семенихин Б. А., Агеева Е. В., Латыпов Р. А. Получение износостойких порошков из отходов твердых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – №12. – С. 39–44.

2. Агеев Е. В., Гадалов В. Н., Семенихин Б. А., Агеева Е. В., Латыпов Р. А. Рентгеноструктурный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – №2. – С. 42–44.

3. Агеев Е. В., Гадалов В. Н., Семенихин Б. А., Агеева Е. В., Латыпов Р. А. Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №2(74). – С. 13–16.

4. Агеев Е. В., Семенихин Б. А., Агеева Е. В., Латыпов Р. А. Оценка эффективности применения твердосплавных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов, при восстановлении и упрочнении деталей композиционными гальваническими покрытиями // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №9(81). – С. 14–16.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Карпенко В. Ю. Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в водной среде // Вестник машиностроения. – 2014. – №12. – С. 64–65.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Карпенко В. Ю. Изучение формы и элементного состава порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в водной среде // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №4(112). – С. 14–17.

13. Хорьякова Н. М., Агеев Е. В., Агеева Е. В. Электроэрозионные медные порошки для гальванических покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №4(112). – С. 18–20.

14. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Воробьев Е. А., Осьминина А.С. Получение износостойких покрытий с использованием электродов из твердосплавных электроэрозионных порошков и их исследование // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №4(112). – С. 21–23.

15. Агеев Е. В., Агеева Е. В., Карпенко В. Ю., Осьминина А.С. Получение заготовок твердого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №4(112). –С. 24–27.

16. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Хорьякова Н. М. Изготовление заготовок из медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов электротехнической меди и изучение их свойств // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2014. – №10(40). – С. 10–13.

17. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Карпенко В. Ю. Размерный анализ частиц порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в воде // Вестник машиностроения. – 2015. – №3. – С. 45–46.

18. 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.

19. Агеева Е. В., Латыпов Р. А., Агеев Е. В., Алтухов А. Ю., Карпенко В. Ю. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – №1. – С. 71–76.

20. Агеева Е. В., Латыпов Р. А., Агеев Е. В., Алтухов А. Ю., Карпенко В. Ю. Характеристики электроискровых покрытий, полученных электродами из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – №2. – С. 62–65.

21. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Латыпов Р. А. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия

22. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Пикалов С. В., Агеев Е. В. Состав, структура и свойства медного электроэрозионного порошка, полученного в среде керосина // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – №4. – С. 4–8.

23. Левинсон Е. М. Электроэрозионная обработка металлов. – Л.: Лениздат, 1961. – 184 с.

24. Бурцев В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. –М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

25. Седой В. С., Валевич В. В. Получение высокодисперсных металлических порошков методом электрического взрыва в азоте пониженного давления // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25. – Вып. 14. – С. 81–84.

26. Хольм Р. Электрические контакты. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 464 с.

## REFERENCES

1. Ageev E.V., Gadalov V.N., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. 2010, «Obtaining wear-resistant powders from solid alloy waste», *Procurement in mechanical engineering*, No.12, pp. 39-44.

2. Ageev E.V., Gadalov V.N., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. 2011, «X-ray Structural analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of a hard alloy», *Procurement in mechanical engineering*, No.2, pp. 42-44.

3. Ageev E.V., Gadalov V.N., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. 2011, «X-ray Spectral microanalysis of powder particles obtained by electroerosive dispersion of hard alloy», *Strengthening technologies and coatings*, No.2(74), pp. 13-16.

4. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov RA. 2011, «Evaluation of the effectiveness of the use of hard-alloy powders obtained by electroerosive dispersion of solid-alloy waste in the restoration and strengthening of parts with composite electroplating coatings», *Hardening technologies and coatings*, No.9(81), pp. 14-16.

5. Ageev E.V., Latypov R.A., Ageeva E.V. 2014, «Investigation of properties of electroerosive powders and hard alloy obtained from them by isostatic pressing and sintering», *News of higher educational institutions. Nonferrous metallurgy*, No.6, pp. 51-55.

6. Ageeva E.V., Horakova N.M. Ageev E.V. 2014, «Morphology and elemental composition of copper electroerosion powders suitable for sintering», *Bulletin of mechanical engineering*, No.10, pp. 66-68.

7. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorobyov E.A. 2014, «X-ray Spectral microanalysis of a powder obtained from high-speed steel waste by electroerosive dispersion in kerosene», *Bulletin of mechanical engineering*, No.11, pp. 71-72.

8. Ageeva E.V., Ageev E.V., Karpenko V.Yu. 2014, «X-ray Structural analysis of a powder obtained from tungsten-containing waste by electroerosive dispersion in an aqueous medium», *Bulletin of mechanical engineering*, No.12, pp. 64-65.

9. Ageeva E.V., Horyakova N.M., Ageev E.V. 2014, «Investigation of the form and morphology of electroerosive copper powders obtained from waste», *Bulletin of mechanical engineering*, No.8, pp. 73-75.

10. 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», *Bulletin of mechanical engineering*, No.9, pp. 63-64.

11. Ageev E.V., Ageeva E.V., Vorobiev E.A. 2014, «Granulometric and phase compositions of powder obtained from tungsten-containing waste of tool materials by electroerosive dispersion in kerosene», *Hardening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 11-14.

12. Ageeva E.V., Ageev E.V., Karpenko V.Yu. 2014, «Study of the form and elemental composition of a powder obtained from tungsten-containing waste of tool materials by electroerosive dispersion in an aqueous medium», *Hardening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 14-17.

13. Horyakova N.M., Ageev E.V., Ageeva E.V. 2014, «Electroerosive copper powders for electroplating coatings», *Strengthening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 18-20.

14. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorobyov E.A., Osminina A.S. 2014, «Obtaining wear-resistant coatings using electrodes from hard-alloy electroerosive powders and their research», *Hardening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 21-23.

15. Ageev E.V., Ageeva E.V., Karpenko V.Yu., Osminina A.S. 2014, «Obtaining hard alloy billets from powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-containing waste», *Hardening technologies and coatings*, No.4(112), pp. 24-27.

16. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M. 2014, «Production of blanks from copper powders obtained by electroerosive dispersion of waste electrical copper and study of their properties», *Science-Intensive technologies in mechanical engineering*, No.10(40), pp. 10-13.

17. Ageeva E.V., Ageev E.V., Karpenko V.Yu. 2015, «Dimensional analysis of powder particles obtained from tungsten-containing waste by electroerosive dispersion in water», *Bulletin of mechanical engineering*, No.3, pp. 45-46.

18. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorobiev E.A. 2015, «Analysis of the shape and morphology of powder particles obtained from tungsten-containing waste by electroerosive dispersion in kerosene», *Bulletin of mechanical engineering*, No.7, pp. 72-73.

19. Ageeva E.V., Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Yu., Karpenko V.Yu. 2015, «Assessment of wear resistance of electric spark coatings obtained using high-speed steel electroerosive powders», *News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings*, No.1, pp. 71-76.

20. Ageeva E.V., Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Yu., Karpenko V.Yu. 2015, «Characteristics of electric spark coatings obtained by electrodes from high-speed steel electroerosive powders», *News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings*, No.2, pp. 62-65.

21. Ageeva E.V., Ageev E.V., Latypov R.A. 2015, «Evaluation of wear resistance of electric spark coatings obtained using high-speed steel electroerosive powders», *News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings*, No.3, p. 45.

22. Ageeva E.V., Horakova N.M. Pikalov, S.V., Ageev E.V. 2015, «Composition, structure and properties of copper spark erosion powder obtained in an environment of kerosene», *News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings*, No.4, pp. 4-8.

23. Levinson E.M. 1961, *Electroerosion treatment of metals.* Leningrad, Lenizdat. 184 p.

24. Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchinsky A.V. 1990, *Electric explosion of conductors and its application in electrophysical installations.* Moscow, Energoatomizdat. 288 p.

25. Gray V.S., Valevich V.V. 1999, «Preparation of highly dispersed metal powders method of electric explosion in the nitrogen of low pressure», *Letters to the ZhTF*, Vol.25, No.14, pp. 81-84.

26. Holm R. 1961, *Electrical contacts*. Moscow, Foreign literature Publishing house. 464 p.

Получено 21.01.2020 г.
Принято в печать 22.10.2020 г.