

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-2-54-60

УДК 621.791

Д. И. ЯКУБОВИЧ, канд. техн. наук, доц.

С. В. СТРЕЛЬЦОВ

А. В. ВАСЕНИЧЕВА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Аннотация

Рассмотрены и проанализированы различные методы получения порошковых материалов. Разработана экспериментальная установка для получения порошковых материалов методом точечного электроэрозионного диспергирования. Получена экспериментальная партия порошка с зернами шарообразной формы.

Ключевые слова:

порошковая металлургия, аддитивные технологии, методы получения порошковых материалов, электроэрозионное диспергирование, металлический порошок.

Для цитирования:

Якубович, Д. И. Разработка установки для электроискрового диспергирования металлов / Д. И. Якубович, С. В. Стрельцов, А. В. Васеничева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 2 (87). – С. 54–60.

Введение

Порошковая металлургия заняла особое место в промышленности. С помощью разнообразных методов производят порошковые материалы, которые имеют уникальные свойства. Из таких порошков можно изготавливать изделия различного функционального назначения, наносить их на поверхность изделий в качестве защитных покрытий методами наплавки или напыления, использовать в качестве добавки для покрытий электродов при электродуговой сварке плавлением, применять для изготовления изделий методами аддитивных технологий и многое другое. Также благодаря порошковой металлургии можно существенно сократить количество отходов при изготовлении изделий либо полностью избавиться от них [1, 7].

Использование мелкодисперсного порошка (до 50 мкм) в сварочных и аддитивных технологиях окажет существенное влияние на структурообразование металла при его первичной кри-

сталлизации. Мелкодисперсная сферическая форма частиц позволит, например, равномерно распределить его по объему покрытия электродов для ручной дуговой сварки, а также применить его для получения изделий в аддитивном производстве.

Наиболее распространенными методами порошковой металлургии являются физико-химические, механические и электроэрозионное диспергирование, которые имеют ряд особенностей.

К физико-химическим методам относятся: электролитический, карбоновый и метод восстановления.

Электролитический метод представляет собой процесс осаждения порошка на катоде из водных растворов солей металла или расплавленных сред. Обладает такими преимуществами, как высокая чистота получаемого порошка, отсутствие необходимости в дополнительном измельчении частиц, относительно низкая температура протекания процесса. При этом метод является довольно дорогостоящим из-за низкой

производительности и высокого расхода электроэнергии.

Карбонильный метод характерен использованием исходных материалов для получения порошков в виде карбониллов металлов, которые подвергаются разложению. Данный процесс протекает при относительно низких температурах, но занимает довольно длительное время (до 5 сут). Карбонилы распадаются на окись углерода и тонкий порошок с размерами частиц 1...8 мкм. Частицы порошка имеют сферическую форму, но большая их часть срастается между собой. Помимо этого, в полученном порошке содержится большое количество примесей кислорода, азота и углерода. Порошок, полученный из карбониллов металла, необходимо подвергать дополнительному отжигу для избавления от примесей [1, 2, 8].

Метод восстановления металлов из оксидов является самым распространенным. Имеет высокую производительность и низкую стоимость. С его помощью можно получить порошки как из черных, так и цветных металлов. Частицы порошка имеют, как правило, форму многогранника с губчатой поверхностью, а размер частиц напрямую зависит от температуры протекания реакции – чем она выше, тем больше гранулы получаемого порошка.

К механическим методам относятся: измельчение в твердом состоянии и получение порошков из расплава. Основной характеристикой данных методов является то, что в процессе измельчения не происходит изменения химического состава исходного материала.

Измельчение металлов и сплавов в твердом состоянии осуществляют в шаровых, вихревых и планетарно-центробежных вибромельницах. В шаровых и планетарно-центробежных вибромельницах измельчение исходного материала происходит за счет его дробления в барабанах, заполненных размазывающими телами. Следствием этого является загрязнение получаемого по-

рошка продуктами истирания размазывающих тел и поверхности барабанов. Данного недостатка нет у вихревых мельниц. Но общим недостатком всех этих методов является низкая производительность, частицы порошка имеют осколочную форму и размеры от 40 до 300 мкм.

Получение порошков из расплава осуществляется методом грануляции, где порошки имеют крупные частицы до 1000 мкм каплевидной или сферической формы. Чаще всего такие порошки идут на дальнейшее измельчение. А также метод распыления отличается более высокой производительностью и получением частиц порошка размерами до 250 мкм. Он представляет собой распыление струи расплавленного металла потоком газа. К его преимуществам можно отнести возможность получения легированных порошков. К недостаткам – низкую чистоту порошка из-за окисления поверхности частиц, а также то, что проблематично распылять металлы и сплавы с высокой температурой плавления. Также метод является довольно дорогостоящим и позволяет получать порошок только в больших объемах, что не всегда целесообразно при проведении первоначальных научных исследований [1–3, 9].

Электроэрозионное диспергирование представляет собой процесс разрушения токопроводящего используемого материала вследствие воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами. В пределах воздействия разряда под влиянием высоких температур происходит нагревание и расплавление используемого материала. Он позволяет получать порошок из любого токопроводящего материала, включая тугоплавкие металлы и сплавы, отличается невысокими затратами энергии и позволяет получить порошок с частицами сферической формы.

Как разновидность данного метода, получила развитие технология диспергирования группы заготовок в раз-

личных средах, при которой с изменением электрических параметров можно контролировать размер получаемых частиц и производительность процесса. При этом с образованием частиц порошка происходит их сваривание между собой, а также сваривание исходного материала с образованием цельной системы, что приводит к короткому замыканию, а это не позволяет получить стабильный процесс образования порошка. Частицы могут получаться эллиптической формы [4].

Анализ методов показал, что существующие устройства и методы не всегда обеспечивают получение частиц сферической формы с размерами до 50 мкм, которые необходимы для управления процессом структурообразования кристаллизующегося металла как при дуговой сварке плавлением, так и при формировании изделия методами аддитивных технологий. Также возникают сложности с получением порошка из тугоплавких металлов и сплавов с высокой температурой плавления. Еще одной сложностью является получение различных по химическому составу порошковых материалов и в небольших объемах, что необходимо для снижения затрат при проведении научных исследований.

Наиболее перспективным методом быстрого производства мелкодисперсных порошков округлой формы в небольших объемах (до 50 мл) из металлов различного химического состава является метод электроэрозионного диспергирования, который был взят за основу при разработке экспериментальной установки для точечного электроэрозионного диспергирования металлов и сплавов [5].

Сущность данного метода заключается в том, что в разработанной установке предусмотрена система принудительного отрыва электрода от диспергируемой поверхности, которая позволяет избежать его приваривания. Таким образом, в процессе точечного дисперги-

рования образуется мелкодисперсный порошок с частицами шаровидной формы [6].

Исходными данными для проектирования были выбраны следующие параметры: мощность установки – 1,5 кВт, напряжение – 50...250 В, частота – 2...300 Гц, емкость – 1...10 000 мкФ.

Выбор диапазона данных параметров обусловлен необходимостью варьирования каждого параметра в большом диапазоне для установления их оптимальных значений с целью получения частиц порошка заданного гранулометрического состава, основным из которых является дисперсность 1...50 мкм. Блок-схема разработанной установки представлена на рис. 1.

Источник питания состоит из трансформатора мощностью 1,5 кВт и выпрямителя, собранного на диодах ВК2-200 по схеме Ларионова. Между трансформатором и выпрямителем расположен блок управления напряжением, работающий на синисторах ВТА 41-600BRG. Регулятор напряжения собран на оптронах МОС 3063 с управлением от динисторов ДБЗ. Далее находится ограничивающее сопротивление размером 4 Ом. Накопительная емкость представляет собой блок пусковых конденсаторов СД-60 емкостью 1 000 мкФ (общая емкость – 10 000 мкФ). Силовой ключ выполнен теристором ТЛ 250-10. Датчики разряда и заряда собраны на денисторах ДБЗ и оптронах Р627, но имеют разные настройки. Система перемещения электрода в установке представлена на рис. 2.

Система перемещения электрода в установке представляет собой шкив, которому передается вращение от передачи. К шкиву крепится диспергирующий электрод через водило, которое передает не только вращательное движение, но и прижимает электрод к диспергируемой поверхности. В процессе диспергирования между электродом и диспергирующей поверхностью подается напряжение, а постоянное перемещение

электрода не дает ему привариться к поверхности и тем самым предотвра-

ет возникновение короткого замыкания в системе.

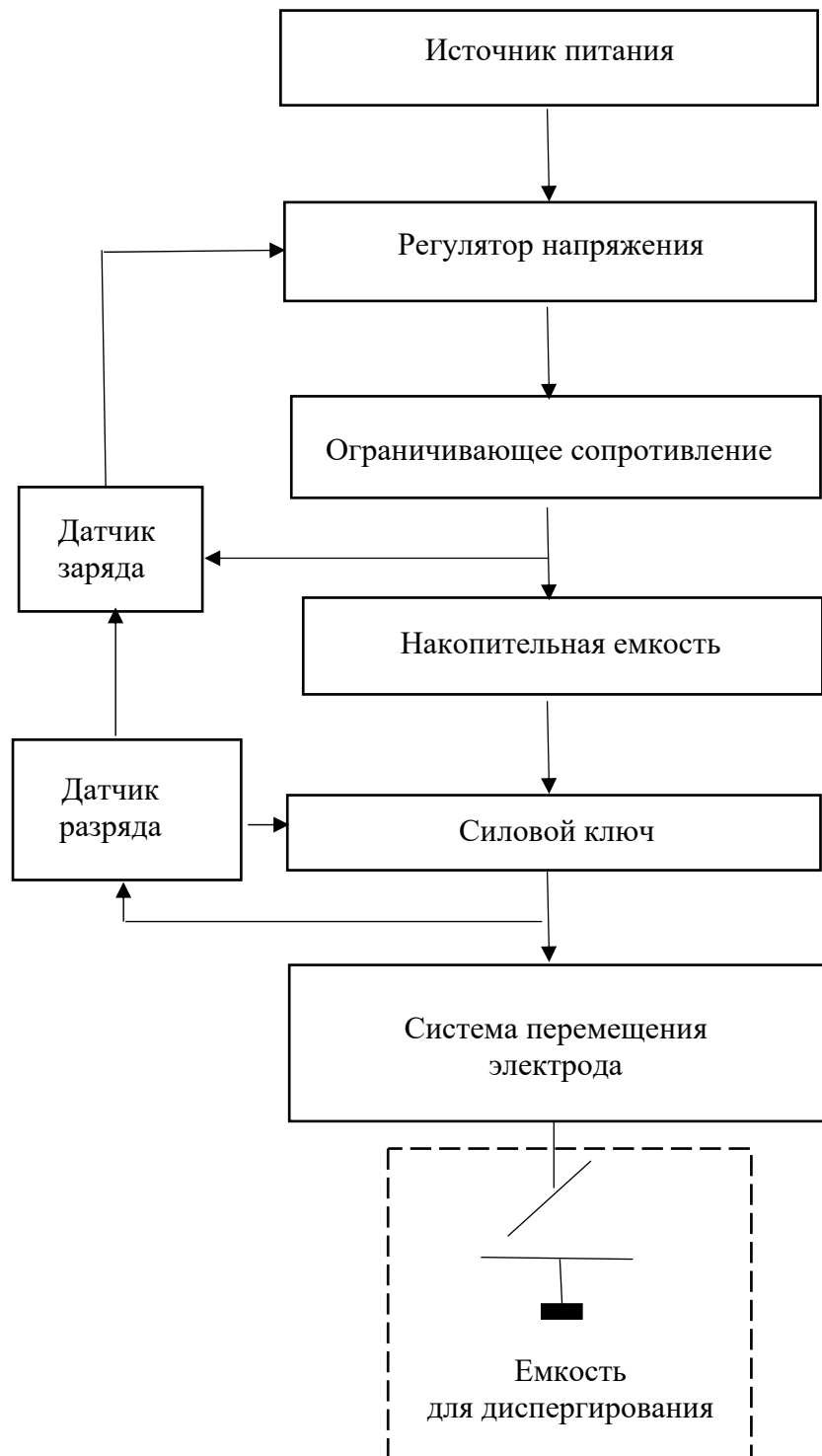


Рис. 1. Блок-схема установки для точечного диспергирования

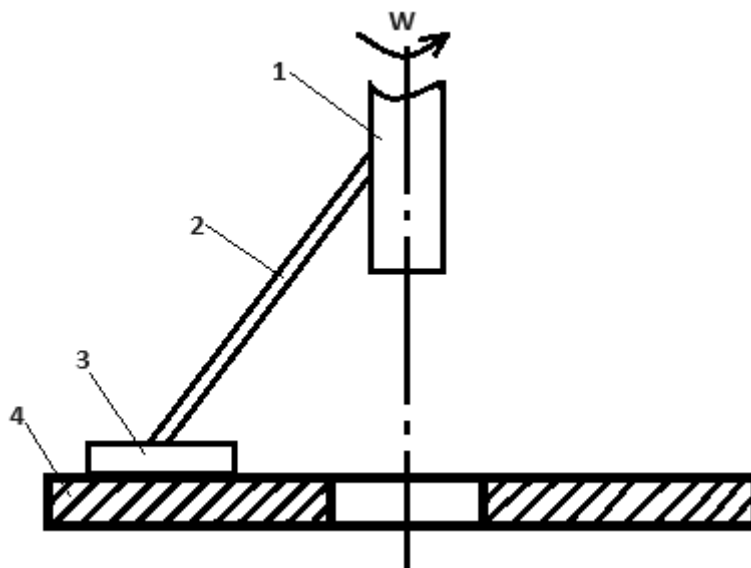


Рис. 2. Система перемещения электрода в установке: 1 – шкив; 2 – водило; 3 – диспергирующий электрод; 4 – диспергируемая поверхность

Напряжение от источника питания подается на регулятор напряжения, на котором установлено рабочее напряжение, требуемое по технологии и поддерживаемое постоянным с помощью регулятора напряжения. Это напряжение через ограничительное сопротивление, необходимое для ограничения уровня тока (чтобы предотвратить перегорание полупроводниковых элементов источника питания и регулятора напряжения), подается на накопительную емкость, приводящее к ее заряду от нуля до рабочего напряжения. Уровень рабочего напряжения задается и контролируется датчиком заряда. По мере падения напряжения на накопительной емкости из-за ее внутреннего разряда (любая емкость имеет внутреннее напряжение разряда, т. е. она саморазряжается) датчик заряда поддерживает это напряжение постоянным.

С накопительной емкости по команде системы, после того как заряд накопительной емкости окончен, включается силовой ключ, который передает весь заряд емкости через систему перемещения электрода или осциллятор на диспергируемую поверхность. При раз-

ряде накопительной емкости напряжение на ней падает до уровня, близкого к нулю, что контролируется датчиком разряда. Эта информация с датчика разряда поступает на датчик заряда и включается регулятор напряжения, происходит процесс заряда емкости. Силовой ключ в этот момент отключен. Как только емкость зарядится, информация поступит на датчик заряда и отключится регулятор напряжения. Далее включается силовой ключ и разряд на диспергируемую поверхность повторяется, т. е. в системе не регулируется скорость заряда и разряда, они протекают автоматически. Скорость заряда будет зависеть от мощности источника питания, величины ограничивающего сопротивления, накопительной емкости. Скорость разряда – от уровня разряжаемой емкости и переходного сопротивления.

Для выявления работоспособности установки проводилось точечное диспергирование меди М1 и твердого сплава ВК6. В разработанную установку помещались образцы размерами $10 \times 10 \times 5$ мм с последующим осуществлением процесса диспергирования в атмосфере воздуха. В емкости для

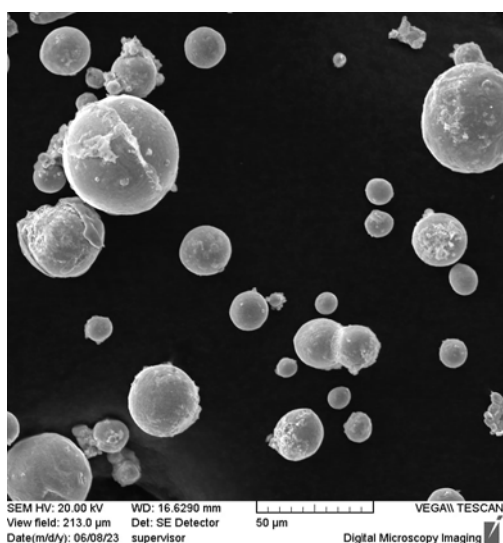
диспергирования под воздействием искрового разряда поверхность диспергируемого металла мгновенно расплавлялась и образовавшийся жидким металл удалялся в пространство емкости. Формирование капель осуществлялось в основном под влиянием сил поверхностного натяжения с последующей их кристаллизацией и охлаждением до комнатных температур. В результате были получены экспериментальные партии образцов порошков объемом до 0,5 см³.

Существенным критерием качества и применимости порошковых материалов в технологиях аддитивного и сварочного производства изделий является морфология поверхности и размер частиц образующихся порошковых материалов. Для определения данных па-

раметров проводились исследования на сканирующем электронном микроскопе Tescan vega 2sba. По данным сканирующей микроскопии все частицы имеют округлую форму. Больше половины частиц порошка имеют размеры до 50 мкм. На некоторых частицах наблюдается процесс их слипания между собой, в основном мелких частиц с крупными. Внешний вид частиц порошков представлен на рис. 3.

В единичных случаях обнаружены поры на сформировавшихся поверхностях. В первую очередь это связано с образованием частиц в атмосфере воздуха, где присутствует в большом количестве азот и кислород, являющиеся причиной образования пор.

а)



б)

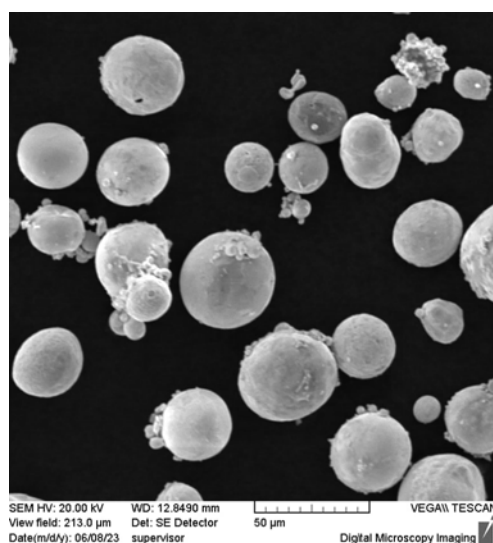


Рис. 3. Внешний вид частиц порошка, полученных из меди М1 (а) и твердого сплава ВК6 (б)

Заключение

1. Разработана экспериментальная установка для точечного электроискрового диспергирования металлов, позволяющая производить обработку различных металлов, в том числе и тугоплавких, с варьированием режимов обработ-

ки в следующих пределах: U – 50...250 В, f – 20...300 Гц, C – 1...10 000 мкФ.

2. Разработана методика точечного электроискрового диспергирования металлов, позволяющая получить мелкодисперсный порошок сферической формы с размерами частиц до 50 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гречкин, П. В.** Современные методы получения тонкодисперсных металлических порошковых материалов / П. В. Гречкин, Н. Е. Корниенко // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. – 2019. – С. 138–148.
2. **Гропянов, А. В.** Порошковые материалы / А. В. Гропянов, Н. Н. Ситов, М. Н. Жукова. – СПб.: СПбГУПТД, 2017. – 74 с.
3. **Якубович, Д. И.** Получение мелкодисперсных порошков из железоуглеродистых сплавов центробежным распылением / Д. И. Якубович, С. В. Стрельцов, А. И. Хабибуллин // Жизненный цикл конструкционных материалов: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. – Иркутск, 2022. – С. 81–86.
4. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е. В. Агеев [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 1 (46). – С. 85–90.
5. Разработка способа получения мелкодисперсного порошка меди для аддитивных технологий / Д. И. Якубович, С. В. Стрельцов, Л. М. Гуревич [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – С. 51–56.
6. **Якубович, Д. И.** Пути стабилизации процесса точечного диспергирования металла / Д. И. Якубович, С. В. Стрельцов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 182.
7. **Анциферов, В. Н.** Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин. – Л.: Металлургия, 1987. – 793 с.
8. **Патон, Б. Е.** Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Б. Е. Патон. – М.: Машиностроение, 1974. – 770 с.
9. **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки : учеб. пособие / В. П. Куликов. – М.; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 388 с.

Статья сдана в редакцию 14 марта 2025 года

Контакты:

d.i.yakubovich@mail.ru (Якубович Дмитрий Иванович);

irynast555@yandex.by (Стрельцов Сергей Васильевич);

tav-89@yandex.by (Васеничева Анна Владимировна).

D. I. YAKUBOVICH, S. V. STRELTSOV, A. V. VASENICHEVA

DEVELOPMENT OF AN INSTALLATION FOR ELECTRIC SPARK DISPERSION OF METALS

Abstract

Various methods of obtaining powder materials have been considered and analyzed. An experimental installation for the production of powder materials by the method of spot electroerosion dispersion has been developed. An experimental batch of powder with spherical grains has been obtained.

Keywords:

powder metallurgy, additive technologies, methods for obtaining powder materials, electroerosion dispersion, metal powder.

For citation:

Yakubovich, D. I. Development of an installation for electric spark dispersion of metals / D. I. Yakubovich, S. V. Streltsov, A. V. Vasenicheva // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 2 (87). – P. 54–60.