

# Использование электрической дуги для получения металлических порошков

\* В. М. Боков<sup>a</sup>, \*\* О. Ф. Сиса<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Центральноукраинский национальный технический университет,  
г. Кропивницкий, 25006, Украина, \*e-mail: [victor.alia.knty@gmail.com](mailto:victor.alia.knty@gmail.com); \*\*e-mail: [sisaoleh@ukr.net](mailto:sisaoleh@ukr.net)

Поступила 30.10.2018  
После доработки 17.12.2018  
Принята к публикации 21.12.2018

Получены и исследованы порошки из титанового сплава ВТЗ-1 и твердого сплава ВК-15, предлагается их промышленное использование, а именно для поверхностного напыления. Предложены высокопроизводительные способы и устройства для получения металлических порошков с использованием электрической дуги в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости, которая горит без пауз, позволяющие по сравнению с электроэрозионным диспергированием в насыпном слое повысить производительность диспергирования на порядок и более, а также снизить количество концевых технологических отходов (электродов) в 4–6 раз.

*Ключевые слова:* электрическая дуга, гидродинамический поток, металлический порошок, способы и устройства.

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.5281/zenodo.2629554

## ВВЕДЕНИЕ

Современные способы электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов, которые используют нестационарные формы электрических разрядов в жидкости, обладают низкой производительностью, что связано с наличием пауз между разрядами. Цель работы: повышение производительности получения металлических порошков.

В машиностроении широко применяются металлические порошки разного назначения [1–3]. Способы получения указанных порошков можно условно разделить на две группы [4]. К первой группе относятся механические способы, а ко второй – физико-химические [5, 6]. Иногда с целью улучшения характеристик получаемого порошка применяют комбинированные способы. Данная статья посвящена получению металлических порошков с применением физико-химических способов, в частности способов, в которых электрическая эрозия электродов осуществляется с применением электрической дуги в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости.

Впервые супруги Б.Р. и Н.И. Лазаренко исследовали эффект электрической эрозии электродов для получения металлического порошка в 1943 году. Предложенный ими способ электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов электроискровым электрическим разрядом в диэлектрической жидкости позволил получать металлические порошки с

регулируемыми дисперсностями и гранулометрическим составом. Однако производительность этого процесса, которая связана с применением нестационарных форм электрических разрядов большой скважности ( $q \gg 10$ ) и вызванными ими паузами, весьма мала, что не удовлетворяет непрерывно растущие потребности производства.

Дальнейшее повышение производительности диспергирования токопроводящих материалов связано с возможностью сокращения вынужденных пауз между разрядами, то есть путем уменьшения их до скважности  $1 < q < 10$ . Так, переход от относительно короткого во времени электроискрового разряда к более продолжительному электроимпульсному [7, 8] позволил повысить производительность диспергирования, но незначительно. Тепловая теория электрической эрозии, известная из работ [9, 10], поясняет, что производительность электроэрозионного разрушения электродов пропорциональна вводимой в рабочую зону мощности технологического тока. Но при создании генераторов импульсов большой мощности обнаружилось пока не преодолимые технические трудности.

Из вышесказанного логично вытекает, что существенное повышение производительности диспергирования следует ожидать от применения стационарной электрической дуги, которая, с одной стороны, обеспечивает электрическую эрозию электродов без пауз (непрерывный процесс:  $q = 1$ ), а с другой – возмож-

ность вводить большие мощности технологического тока в рабочую зону относительно простыми техническими средствами.

Но авторы работы [7] утверждают следующее: «Тепловой эффект, создаваемый стационарной дугой, для электроэрозионного диспергирования непригоден, так как при этом расплавляются большие объемы материала. Поэтому существенным условием нормального хода процесса электроэрозионного диспергирования является необходимость стабильного поддержания импульсного тока и предупреждение перехода импульсных разрядов в электрическую дугу». С утверждением данных авторов можно согласиться, так как они говорят об электрической дуге, свободно горящей между электродами, погруженными в жидкость. Такая дуга обладает низкими энергетическими характеристиками и близка к сварочной, а поэтому непригодна для электроэрозионного диспергирования.

В настоящей работе предложены и исследованы новые высокопроизводительные способы и устройства для получения металлических порошков, в которых использована *электрическая дуга в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости*. Такая дуга сжата потоком, а поэтому существенным образом отличается от сварочной. Так, по сравнению с обычными сварочными и пламенными дугами электрическая дуга в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости обеспечивает [11]:

- уменьшение площади поперечного сечения дуги в несколько раз;
- уменьшение длины дуги в несколько десятков раз;
- увеличение плотности тока в столбе дуги в несколько раз, что соответствует плотности тока в столбе нестационарного электрического разряда. Так, увеличение динамического давления в диапазоне 0,02–1 МПа позволяет повысить плотность тока в столбе дуги до 150–480 А/мм<sup>2</sup>. Плотность тока такого уровня в электроимпульсной обработке наблюдается при длительности импульса порядка 10<sup>-3</sup> с и меньше. Для сравнения отметим, что плотность тока в сварочной дуге, горящей в воздухе, не превосходит 30 А/мм<sup>2</sup> [12];
- уменьшение суммарной высоты катодной и анодной областей дуги для стальных электродов в 2–4,8 раза;
- увеличение напряженности поля в столбе дуги в десятки раз. Она достигает 3 кВ/см и больше, что соответствует напряженности поля в столбе нестационарного электрического разряда;
- увеличение объемной плотности тепловой мощности в десятки раз.

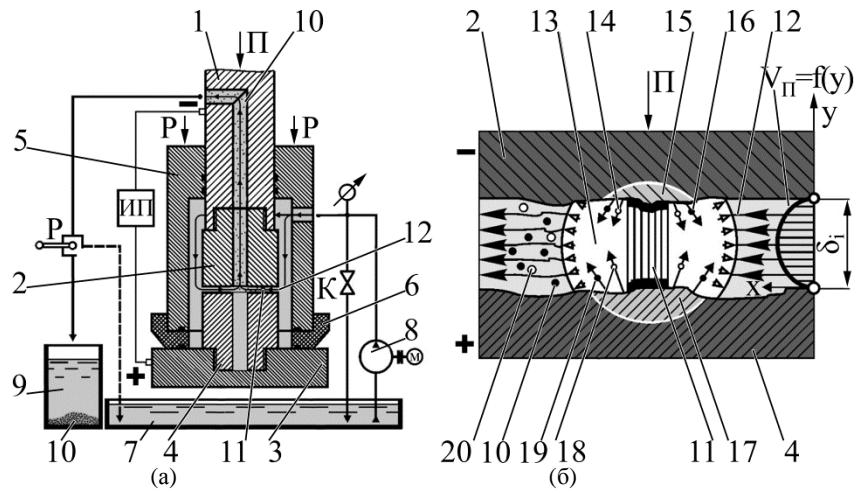
Как будет показано ниже, электрическая дуга в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости, по мнению авторов, может быть эффективно использована для получения металлических порошков [13].

## МЕТОДИКА

С методической точки зрения металлический порошок может быть получен с использованием электрической дуги в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости двумя способами:

- 1) как продукт диспергирования специально подготовленных заготовок;
- 2) в качестве отходов (продукты эрозии электродов) от реализации способа электродуговой обработки двух одинаковых плоских поверхностей в биполярном режиме [14].

Для реализации способа 1) процесс диспергирования двух электродов-заготовок с титанового сплава ВТЗ-1 осуществлялся на экспериментальной установке (рис. 1а), которая смонтирована на базе электроэрозионного копировально-прошивочного станка, реализующего процесс размерной обработки дугой. На подвижном в вертикальном направлении шпинделе 1 закреплена электрод-заготовка 2 и присоединена к катоду, а на нижней неподвижной плите 3 закреплена электрод-заготовка 4 и присоединена к аноду. Обе электрод-заготовки имеют одинаковый наружный диаметр и центральное отверстие для того, чтобы не образовывался технологический выступ. Образование выступа приводит к удлинению трассы эвакуации продуктов эрозии, нарушению гидродинамического режима потока и изменению гранулометрического состава полученного металлического порошка. Рабочая зона установки ограждена герметичной камерой 5, которая изолирована от плиты 3 электроизолятором 6. Установка имеет бак 7 с рабочей жидкостью (технической водой), насосную установку 8, байпасную систему регулирования давления (с помощью крана К), отдельную емкость 9 для отбора и отстоя металлического порошка 10 и источник питания технологическим током ИП (выпрямитель для пламенно-дуговой резки типа ВПР-602). Для запуска процесса закрывают камеру 5, прижимая ее вместе с изолятором 6 с усилием Р к плите 3; включают насосную установку 8 и под технологическим давлением подают рабочую жидкость в камеру 5; включают технологический ток, систему автоматического слежения за торцевым межэлектродным зазором (на схеме не показана) и ведут процесс электроэрозионного диспергирования компактных электрод-заготовок 2, 4



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для диспергирования электропроводных материалов с использованием электрической дуги в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости: (а) – схема установки; (б) – схема горения дуги. Условные обозначения: 1 – шпиндель станка; 2 – электрод-заготовка (катод); 3 – плита; 4 – электрод-заготовка (анод); 5 – герметичная камера; 6 – электроизолятор; 7 – бак; 8 – насосная установка; 9 – емкость для отбора и отстоя металлического порошка; 10 – металлический порошок (твердые продукты эрозии электродов); 11 – электрическая дуга; 12 – поперечный гидродинамический поток; 13 – газовый пузырь; 14 – газообразная частица материала катода; 15 – микропорция материала, выплавленного с катода; 16 – расплавленная частица материала катода; 17 – микропорция материала, выплавленного с анода; 18 – газообразная частица материала анода; 19 – расплавленная частица материала анода; 20 – частица газовой фазы продуктов эрозии.

электрической дугой 11 в гидродинамическом потоке 12 рабочей жидкости. Полученная таким образом дуга 11 перемещается по торцевым поверхностям электрод-заготовок 2, 4 и последовательно разрушает их. Поскольку она имеет высокие энергетические характеристики, происходят интенсивное локальное испарение материала электродов и капельный выброс расплава.

На рис. 1б показана схема горения дуги 11 между электродом-заготовкой 2 и электродом-заготовкой 4 в гидродинамическом потоке 12 рабочей жидкости. Собственно говоря, поток 12 не воздействует непосредственно на дугу 11, а воздействует на газовый пузырь 13 и тем самым ограничивает его расширение. Причем чем больше скорость потока  $V_n$ , тем больше сжата дуга 11 в диаметре (то есть тем меньше диаметр элементарной лунки), тем меньше межэлектродный зазор  $\delta_i$ , а следовательно, тем больше сжата дуга в энергетическом смысле. По сути, если на обычную сварочную дугу воздействовать поперечным потоком жидкости, она либо должна погаснуть («умереть»), либо приспособиться к новым условиям: сжаться и «выстоять». В последнем случае дуге необходимо создать «комфортные» условия горения.

Таким образом, при реализации данного способа электроэрозионного диспергирования [13] гидродинамический поток рабочей жидкости выполняет тройную функцию:

- определяет энергетическое состояние электрической дуги как инструмента диспергирования;

- определяет геометрическое состояние электрической дуги как возможность управления превалирующей дисперсностью полученного металлического порошка;

- отвечает за процесс удаления металлического порошка (продуктов эрозии электродов) из зоны горения дуги и интенсифицирует его. Это создает условия для стабилизации процесса диспергирования.

Процесс диспергирования электродов из титанового сплава ВТ3-1 осуществлялся при следующем режиме: сила технологического тока – 500 А; напряжение на дуге – 57 В; статическое давление рабочей жидкости на входе потока в межэлектродный зазор – 13,5 МПа; обратная прокачка.

После естественного отстоя в емкости 9 осадок фильтровали и просушивали в электрошкафу при температуре 80–100°C.

Для реализации способа 2) непрерывно отбирали продукты эрозии (твердосплавный порошок) в процессе размерной обработки дугой двух одинаковых торцевых плоских поверхностей цилиндрических деталей из твердого сплава ВК-15 в биполярном режиме. Отбор осуществляли с помощью гидроциклона типа Х45-3. Возможность использования гидроциклона обусловлена большой плотностью твердосплавного порошка ( $\rho = 14,1 \text{ г/см}^3$ ), которая способствует осаждению частиц в условиях резкого расширения потока. В качестве рабочей жидкости использовалась органическая среда (смесь индустриального масла 20А и керосина осветительного в соотношении 1:1).

Процесс диспергирования электродов из твердого сплава ВК-15 осуществлялся при следующем режиме: сила технологического тока – 100–200 А; напряжение на дуге – 30 В; статическое давление рабочей жидкости на входе потока в межэлектродный зазор – 0,8–1,2 МПа; обратная прокачка. В качестве источника питания технологическим током использовался сварочный выпрямитель ВДУ-504 с крутопадающей вольт-амперной характеристикой.

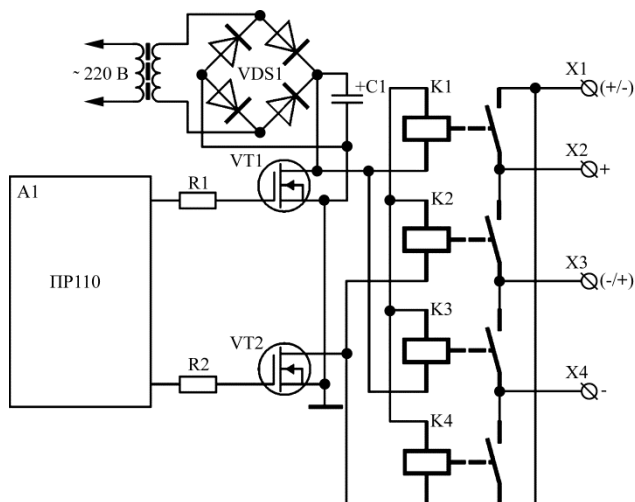


Рис. 2. Принципиальная схема электромеханической системы изменения полярности в процессе электродугового диспергирования электродов (биполярный режим работы).

Биполярный режим диспергирования электродов необходим для обеспечения равномерного их разрушения, так как электроэрозионный процесс, как известно, униполярный. Принципиальная схема электромеханической системы изменения полярности в процессе электродугового диспергирования электродов показана на рис. 2. При работе напряжение питания ( $U = 220$  В) подается на трансформатор Tr1 и систему управления A1, а силовое постоянное напряжение ( $U_{ин} = 50–80$  В) – на клеммы X2 и X4. Из трансформатора Tr1 сниженное напряжение подается на диодный мост VDS1, где выпрямляется и фильтруется емкостью C1, а дальше попадает на транзисторные ключи управления VT1, VT2 и катушки силовых контакторов K1, K4. В зависимости от необходимой частоты переключений  $f$  (обычно  $f = 0,05–0,5$  Гц), которая запрограммирована в программном реле A1, включается режим, и электронная система управления A1 формирует необходимый сигнал управления по амплитуде и частоте. Далее сигнал подается на резисторы R1, R2, а затем на транзисторные ключи VT1, VT2. При открытии транзисторного ключа VT1 срабатывают катушки управления контакторов K1, K3, и силовое напряжение

подается на электроды в прямом направлении. При открытии транзисторного ключа VT2 срабатывают катушки управления контакторов K2, K4 и силовое напряжение переключается на электроды в обратном направлении. При этом катушки K1 и K3 размыкаются. Далее цикл повторяется.

Полученный твердосплавный порошок трижды промывали в техническом спирте и высушивали на металлическом поддоне в электрошкафу при температуре 80–100°C.

Характеристики полученных металлических порошков в настоящей работе изучались методами порошковой металлургии.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Порошок из титанового сплава ВТ3-1

Процесс электродугового диспергирования данного сплава способом 1) на указанном выше режиме выполнялся с производительностью  $M = 15244$  мм<sup>3</sup>/мин при торцевом межэлектродном зазоре  $\delta = 0,12$  мм. Разделение порошка по фракциям и изучение их дисперсности осуществлялось методом ситового анализа (рис. 3). Для изучения распределения по размерам частиц, меньших 0,056 мм, проведен микроскопический анализ (табл. 1) [15].

Форма частиц изучалась с помощью оптического микроскопа МИМ-7. На рис. 4 представлены результаты исследования формы частиц по фракциям.

Более полное представление о форме частиц получено при изучении шлифов порошка (рис. 5).

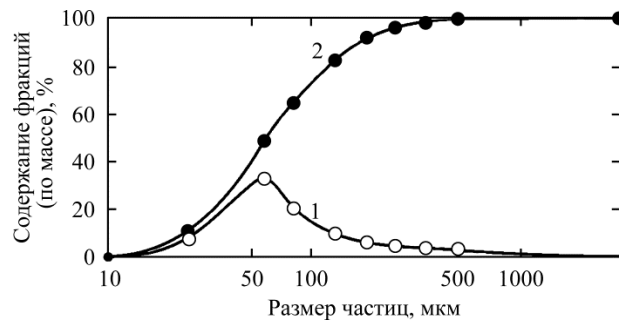
В силу особенностей процесса получения частицы порошка могут обладать значительной пористостью, в результате чего плотность частиц порошка может значительно отличаться от плотности компактного материала электрода-заготовки. Кроме того, на плотность порошка существенное влияние оказывает окисленность частиц.

Плотность частиц порошка (табл. 2) определялась пикнометрическим методом.

Рентгеноструктурные исследования проведены на установке УРС-60 с помощью камеры РКД (рентгеновская камера Дебая). Изучался фазовый состав порошка фракции  $-0,050+0,000$  (табл. 3).

### Порошок из твердого сплава ВК-15

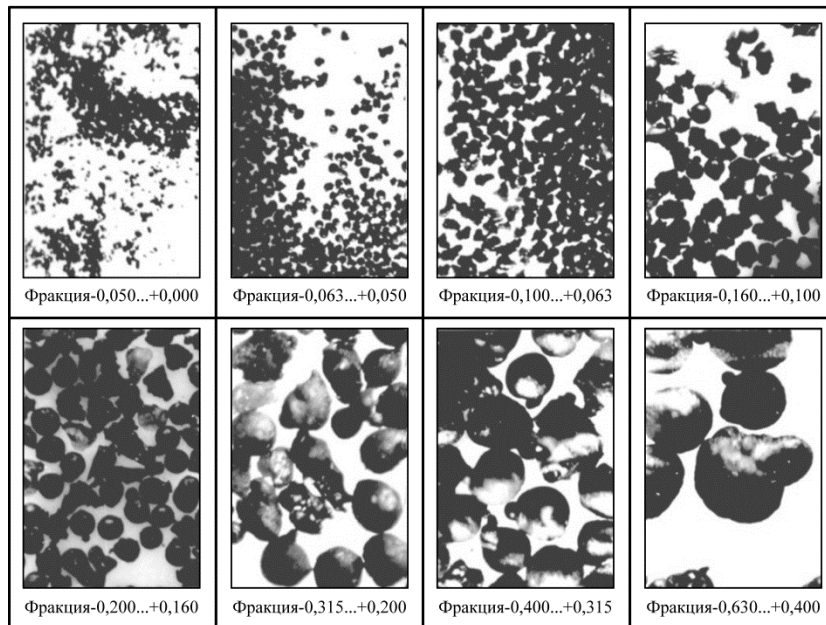
Процесс электродугового диспергирования данного твердого сплава способом 2) на указанном выше режиме выполнялся с производительностью  $M = 800–1700$  мм<sup>3</sup>/мин при



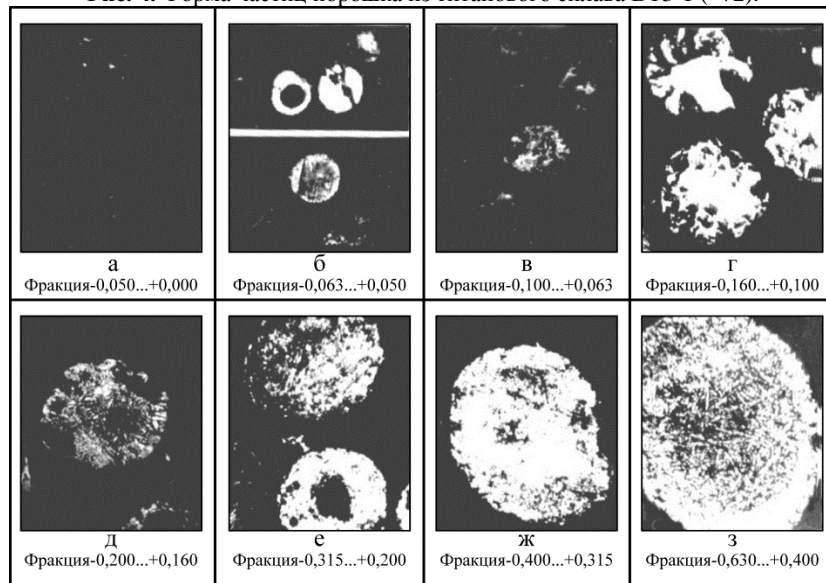
**Рис. 3.** Распределение по размерам частиц порошка из титанового сплава ВТЗ-1: 1 – дифференциальная кривая; 2 – интегральная кривая.

**Таблица 1.** Результаты микроскопического анализа порошка из титанового сплава ВТЗ-1 фракции  $-0,050+0,000$

Общее количество измеренных частиц	Единицы измерения	Размеры частиц, мкм					Количество сферических частиц
		До 10	11–20	21–30	31–40	41–50	
1024	шт.	806	70	69	41	39	82
100	%	78,7	6,8	6,7	4,0	3,8	8,0



**Рис. 4.** Форма частиц порошка из титанового сплава ВТЗ-1 ( $\times 72$ ).



**Рис. 5.** Микроструктура частиц порошка из титанового сплава ВТЗ-1: (а), (б), (в), (г), (д) –  $\times 246$ ; (е), (ж), (з) –  $\times 144$ .

**Таблица 2.** Пикнометрическая плотность частиц порошка из титанового сплава ВТЗ-1 по фракциям

Фракция	-0,630... +0,400	-0,400... +0,315	-0,315... +0,200	-0,200... +0,160	-0,160... +0,100	-0,100... +0,063	-0,063... +0,050	-0,050... +0,000
Пикнометрическая плотность, г/см <sup>3</sup>	4,34	4,48	4,56	4,32	4,29	3,74	3,80	3,45

**Таблица 3.** Фазовый состав частиц порошка фракции -0,050+0,000

№ п/п	Экспериментальные результаты		Литературные данные					
	Интенсивность линии, <i>I</i>	<i>d/n</i> , нм	Фаза TiO [16]			Фаза α-титан		
			<i>I</i>	<i>d/n</i> , нм	<i>HKL</i>	<i>I</i>	<i>d/n</i> , нм	<i>HKL</i>
1	сл.	0,2420	с.	0,2410	111	–	–	–
2	сл.	0,2250	–	–	–	100	0,2240	101
3	ср.	0,2080	о. с.	0,2090	200	–	–	–
4	оч. сл.	0,1698	–	–	–	40	0,1728	102
5	с.	0,1475	о. с.	0,1472	220	40	0,1477	110
6	сл.	0,1261	ср.	0,1258	311	–	–	–
7	оч. сл.	0,1204	ср.	0,1202	222	–	–	–

торцевом межэлектродном зазоре  $\delta = 0,03-0,08$  мм. Разделение порошка по фракциям и изучение их дисперсности осуществлялось методом ситового анализа (рис. 6).

Форма и микроструктура частиц изучались с помощью растрового электронного микроскопа модели РЭМ-106И с погрешностью измерения величин не более 1 мкм. Результаты исследования представлены в виде фрактографического анализа в табл. 4.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Порошок из титанового сплава ВТЗ-1*

Результаты разделения порошка по фракциям (см. рис. 3) говорят о том, что в порошке наиболее часто встречаются частицы размером 0,056 мм. Результаты микроскопического анализа распределения частиц, меньших 0,056 мм (см. табл. 1), позволили установить, что наибольшую долю в количественном отношении составляют частицы размером менее 10 мкм.

Из результатов исследования формы частиц по фракциям (см. рис. 4) видим, что наиболее часто встречаются частицы сферической формы, количество которых увеличивается с увеличением размера частиц. Так, в наиболее мелкой фракции содержание их составляет лишь 8% (см. табл. 1). Основная масса порошка данной фракции представлена пылевидными частицами неправильной формы. Эти частицы не имеют металлического блеска. Во всех фракциях наблюдаются частицы неправильной формы с металлическим блеском. Эти частицы, по-видимому, образовались в результате механического разрушения электродов.

При изучении шлифов порошка (см. рис. 5) выявлены полые отдельные частицы сфери-

ческой формы. Физический механизм их образования связан с перемещением потоком капли расплавленного дугой металла в межэлектродном зазоре из зоны высокого давления (на периферии электродов, то есть там, где она образовалась и начала охлаждаться с поверхности) в зону низкого давления (на выходе капли из торцевого межэлектродного зазора). Для новых условий слегка застывшая с поверхности капля оказывается перегретой внутри. Она закипает и взрывается (фазовый взрыв) с образованием частицы вулканообразной формы (рис. 7).

Из результатов исследования пикнометрической плотности частиц порошка (см. табл. 2) выявлено, что лишь плотность крупных частиц близка к плотности компактного сплава ВТЗ-1 ( $\rho = 4,5$  г/см<sup>3</sup>). Уменьшение пикнометрической плотности с уменьшением размера частиц, как следует из микроструктурных исследований, вероятно, вызвано увеличением окисленности частиц и увеличением доли усадочных раковин.

Результаты рентгеноструктурных исследований позволили установить, что фазовый состав порошка практически не зависит от размера частиц. На рентгенограммах имеются линии α-титана (см. табл. 3) и, как показало индирование, линии от гранцентрированной решетки. Период кристаллической решетки данной фазы, рассчитанный по линии (422), равен 0,418 нм. Сравнение полученных данных с литературными [16] указывает на то, что данной фазой является моноокись титана TiO. Таким образом, порошок из титанового сплава ВТЗ-1 состоит из твердого раствора на основе α-титана и монооксида титана.

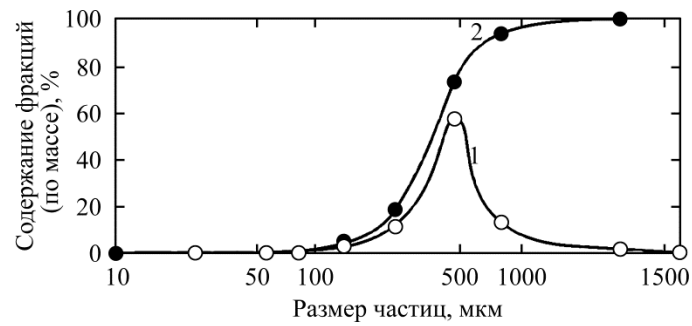


Рис. 6. Распределение по размерам частиц порошка из твердого сплава ВК15: 1 – дифференциальная кривая; 2 – интегральная кривая.

Таблица 4. Фрактографии частиц порошка из твердого сплава ВК15, полученные способом 2

	Внешняя форма частиц		Частицы в сечении	
-0,063...+0,050				
-0,100...+0,063				
-0,160...+0,100				
-0,315...+0,160				
-0,630...+0,315				
-1,000...+0,630				
-1,600...+1,000				

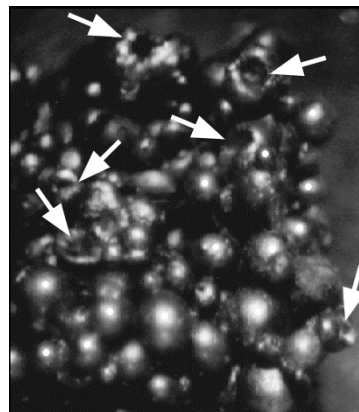
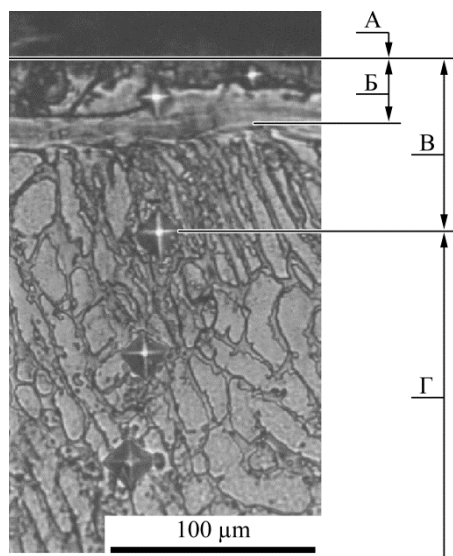


Рис. 7. Скопление частиц порошка на выходе из межэлектродного зазора: стрелками показаны частицы вулканообразной формы ( $\times 72$ ).

Данные рентгеноструктурного анализа согласуются с микроструктурными исследованиями. Центральный участок частиц состоит из  $\alpha$ -титана, имеющего дендритную структуру (см., например, микроструктуру частиц фракции  $-0,400...+0,315$  на рис. 5), а для мелких частиц – преимущественно ячеистую структуру. По сравнению с компактным сплавом (рис. 8) порошки имеют более дисперсную микроструктуру. Микротвердость частиц, измеренная с помощью прибора ПТМ-3 [16, с. 112–113], с увеличением размеров фракции порошка изменяется от  $825 \cdot 10^5$  до  $1450 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, в то время как микротвердость компактного сплава составляет  $360 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>.



**Рис. 8.** Микроструктура поверхностного слоя электрода-заготовки из титанового сплава ВТЗ-1 после электродугового диспергирования: *A* – поверхность взаимодействия с электрической дугой; *B* – белый слой; *V* – зона термического влияния; *Г* – зона не измененного компактного сплава.

Изменение микроструктуры и увеличение микротвердости порошка вызваны перекристаллизацией сплава при формировании порошков в условиях больших скоростей охлаждения. Возможно также образование метастабильной  $\alpha'$ -фазы, дисперсность которой, а следовательно, и твердость тем выше, чем выше скорость охлаждения (меньше размеры порошка). Наружный слой, особенно частиц мелкой фракции, имеет рыхлое, легко разрушаемое строение, указывающее на то, что это слой монооксида титана.

Порошки после восстановления могут быть использованы в порошковой металлургии титана. Для уменьшения степени окисления порошка необходимы дальнейшие исследования в направлении использования различных рабочих сред и увеличения диапазона режимов диспергирования.

#### *Порошок из твердого сплава ВК-15*

Из результатов проведенных исследований (см. рис. 6) видно, что наибольшее количество частиц порошка сплава ВК-15 наблюдается во фракции  $-0,630...+0,315$  (59,08%). Средний размер частиц этой фракции составляет 0,473 мм.

Как известно из [16], форма частиц зависит от химической природы исходного материала и способа получения порошка. Форма частиц вместе с другими характеристиками влияет на физические и технологические свойства порошков: удельную поверхность, объемную массу, пикнометрическую плотность, текучесть, формируемость, прессуемость, плотность, однородность и прочность объекта прессования. Из табл. 4 видно, что преобладающая форма частиц, полученных из твердого сплава ВК-15, – это частицы сферической формы: правильные сферы; искривленные сферы; сплюснутые сферы разного диаметра; сферы грушеобразной формы; сферы с отростками. Очень редко наблюдаются частицы неправильной формы с острыми углами.

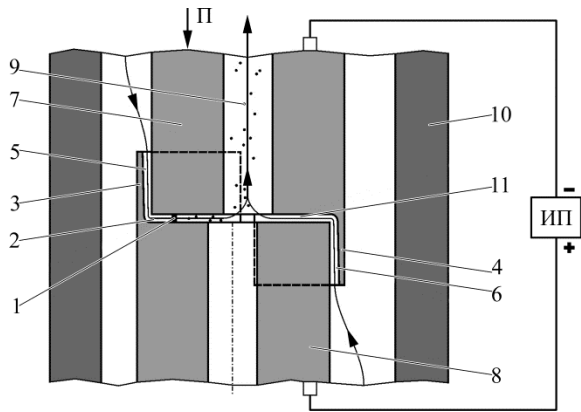
Результаты анализа внутренней структуры частиц из твердого сплава ВК-15 по микрошлифам (см. табл. 4) показали, что частицы имеют сплошную структуру (без внутренних пор). Это позитивно характеризует их как сырье для порошковой металлургии.

#### *Способы и устройства*

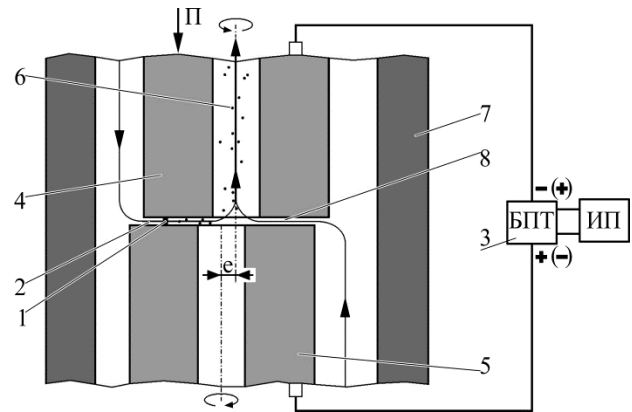
По результатам проведенных исследований предложен способ получения металлических порошков [13] эрозией электродов с применением электрической дуги в регулируемом по скорости поперечном потоке жидкости, при котором регулирование дисперсности порошков осуществляется путем изменения скорости потока и параметров электрического режима (силы тока и напряжения на электродах). Показано, что полученный порошок имеет крупность от 0,01–1,0 мм. Однако установлено, что при случайной несоосности установки электродов наблюдается асимметрия износа их торцевых поверхностей с образованием технологических выступов и бокового межэлектродного зазора (рис. 9). Это отрицательно влияет на равномерность эрозии электродов при промышленном получении порошков.

Для обеспечения равномерности эрозии электродов предложен способ получения металлических порошков [17] эрозией электродов с применением электрической дуги в регулируемом по скорости поперечном потоке жидкости, при котором электроды несоосно вращают в противоположных направлениях, а их полярность периодически меняют (рис. 10). В данном способе несоосность взаимного расположения электродов *e* создается искусственно.

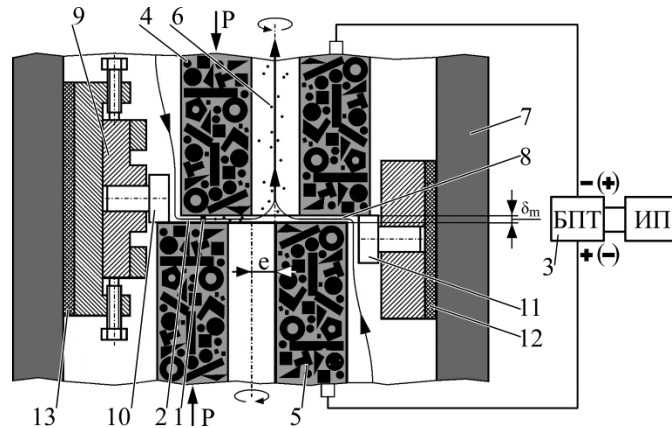




**Рис. 9.** Схема образования технологических выступов на электродах-заготовках и боковых межэлектродных зазоров при реализации способа получения металлических порошков [11]: 1 – электрическая дуга; 2 – поперечный гидродинамический поток; 3, 4 – технологические выступы (необработанная часть); 5, 6 – боковые межэлектродные зазоры; 7, 8 – трубчатые электроды-заготовки; 9 – металлический порошок (продукты эрозии электродов-заготовок); 10 – герметичная камера; 11 – торцевой межэлектродный зазор.



**Рис. 10.** Схема устройства для реализации способа получения металлических порошков [17]: 1 – электрическая дуга; 2 – поперечный гидродинамический поток; 3 – биполярный преобразователь тока; 4, 5 – трубчатые электроды-заготовки; 6 – металлический порошок (продукты эрозии электродов-заготовок); 7 – герметичная камера; 8 – торцевой межэлектродный зазор.



**Рис. 11.** Схема устройства [16] и способа получения металлических порошков [18]: 1 – электрическая дуга; 2 – поперечный гидродинамический поток; 3 – биполярный преобразователь тока; 4, 5 – трубчатые электроды-заготовки; 6 – металлический порошок (продукты эрозии электродов-заготовок); 7 – герметичная камера; 8 – торцевой межэлектродный зазор; 9 – механический регулятор торцевого межэлектродного зазора; 10, 11 – роликовые упоры; 12, 13 – электроизоляторы.

Ее величину изменяют в пределах 0,1–0,9 от толщины стенки трубчатого электрода. Окружную скорость вращения электродов изменяют в пределах 0,02–1,0 м/с. Способ обеспечивает равномерную (плоскопараллельную) эрозию электродов, что сопровождается получением однородных по размерам металлических порошков. Однако для реализации данного способа необходимо устройство, включающее в себя автоматический (как правило, электрический, который работает в следящем режиме) регулятор торцевого межэлектродного зазора, что усложняет его конструкцию. К тому же данное устройство не исключает наличия пауз, которые отрицательно сказываются на эффективности процесса диспергирования.

С целью упрощения конструкции и повышения эффективности процесса за счет стабилизации торцевого межэлектродного зазора

предложено устройство для электроэрозионного получения металлического порошка [18]. В нем регулятор торцевого межэлектродного зазора выполнен в виде жестких консольно закрепленных роликовых упоров (рис. 11), установленных с возможностью воздействия на торцевые поверхности электродов. Для регулировки величины торцевого межэлектродного зазора регулятор снабжен приводом осевого перемещения одного из упоров. Это позволяет: существенно упростить кинематические средства, необходимые для поддержания на постоянном уровне торцевого зазора, и повысить уровень надежности устройства в работе; на 20–30% повысить производительность диспергирования электродов; на 30–40% сократить диапазон частиц основной массы получаемого порошка.

Сегодня получение порошков из отходов твердого сплава (например, пластинок резцов,

сломаных или изношенных пуансонов и матриц) возможно электроэрозионным диспергированием в насыпном слое [7, 19]. Однако эта технология весьма низкопроизводительная, так как она использует нестационарные формы электрического разряда. С целью реализации высокопроизводительного процесса диспергирования предложен способ получения металлических порошков [20] с использованием электрической дуги, в котором в качестве электродов выступает набор заготовок (отходов твердого сплава), соединенных между собой токопроводящей связкой (см. рис. 11). Для получения чистого твердосплавного порошка в качестве токопроводящей связки необходимо применять твердосплавный порошок той же марки, что и марка отходов твердого сплава. Метод соединения отходов со связкой – прессование. Это по сравнению с известным способом позволяет повысить производительность диспергирования на порядок и более, а также снизить количество концевых технологических отходов (электродов) в 4–6 раз.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены высокопроизводительные способы и устройства для получения металлических порошков с использованием электрической дуги в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости, которые обладают следующими преимуществами:

- обеспечивают равномерную (плоскопараллельную) эрозию электродов, что сопровождается получением однородных по размерам металлических порошков;

- позволяют существенно упростить кинематические средства, необходимые для поддержания на постоянном уровне торцевого зазора и повысить уровень надежности устройства в работе; на 30–40% сократить диапазон частиц основной массы получаемого порошка;

- позволяет, по сравнению с электроэрозионным диспергированием в насыпном слое, повысить производительность диспергирования на порядок и более, а также снизить количество концевых технологических отходов (электродов) в 4–6 раз.

Исследован механизм получения порошка и особенности управления его превалирующей дисперсностью. Показана определяющая роль гидродинамического потока рабочей жидкости в плане возможности использования электрической дуги для получения металлических порошков.

Получены и исследованы порошки их титанового сплава ВТЗ-1 и твердого сплава ВК-15. Результаты анализа гранулометрического

состава, формы и внутренней структуры позитивно характеризуют их как сырье для порошковой металлургии, в частности для поверхностного напыления.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Olevsky E.A., Aleksandrova E.V., Pyina A.M., Dudina D.V. et al. *Materials*. 2013, **6**(10), 4375–4440. doi: 10.3390/ma6104375.
2. German R.M. *Materials*. 2013, **6**(8), 3641–3662. doi:10.3390/ma6083641.
3. Angelo P.C. *J Powder Metall Min*. 2015, **4**(129), 1–8. doi:10.4172/2168-9806.1000129.
4. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. *Порошковая металлургия и напыленные покрытия*. М.: Металлургия, 1987. 792 с.
5. Dawes J., Bowerman R., Trepleton R. *Johnson Matthey Technol Rev*. 2015, **59**(3), 243–256. doi:10.1595/205651315x688686.
6. Latypov R.A., Ageeva E.V., Kruglyakov O.V., Latypova G.R. *Russ Metall*. 2016, (6), 547–549.
7. Агеев Е.В., Гадалов В.Н., Семенихин Б.А. и др. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010, **12**, 39–44.
8. Захарченко С.Н. *Технічна термодинаміка*. 2013, **1**, 16–23.
9. Золотых Б.Н., Круглов А.И. *Проблемы электроискровой обработки материалов*. М.: ЦНИЛ-электром, 1960. С. 65–67.
10. Зингерман А.С. *Электрические контакты*. М.–Л.: Энергия, 1960. С. 136–143.
11. Носуленко В.И. *ЭОМ*. 2005,(1), 8–17.
12. Лесков Г.И. *Электрическая дуга*. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
13. Носуленко В.И., Мещеряков Г.Н., Варич Н.И., Литвин Б.Н. и др. А. с. 544510 СССР, МПК В 22F 9/00. *Способ получения металлических порошков*. 1977. Бюл. 4.
14. Боков В.М., Сиса О.Ф., Мирзак В.Я. *ЭОМ*. 2018, **54**(3), 53–63.
15. Паничкина В.В., Уваров И.В. *Методы контроля дисперсности и удельной поверхности металлических порошков*. Киев: Наукова думка, 1973. 168 с.
16. Федорченко И.М., Андреевский Р.А. *Основы порошковой металлургии*. Киев: Академиздат АН УССР, 1963. 420 с.
17. А.с. 782962 СССР, МПК В 22F 9/14. *Способ получения металлических порошков* / Носуленко В.И., Боков В.М. (СССР). 1980. Бюл. 44.
18. Боков В.М. А.с. 1519852 СССР, МПК В 22F 9/14. *Устройство для электроэрозионного получения металлического порошка*. 1989. Бюл. 41.
19. Верхотуров А.Д., Дворник М.И., Ершова Т.Б., Зайцев А.В. *ЭОМ*. 2015, **51**(3), 6–10.
20. Боков В.М., Носуленко В.И. А.с. 782961 СССР, МПК В 22F 9/14. *Способ получения металлических порошков*. 1980. Бюл. 44.

### Summary

Modern methods of electro-erosive dispersion of electrically conductive materials that use non-stationary forms of electrical discharges in fluid have low productivity. That is associated with long pauses of discharges. The objective of this research is to raise the productivity of obtaining metal powders. From a methodological point of view, a metal powder was obtained during in the process of research using an electric arc in the transverse hydrodynamic flow of the working fluid as a product of dispersion of specially prepared work-pieces and as a waste item (electrodes erosion products) of implementing the method of electric-arc treatment of two flat surfaces in the bipolar mode. During the research work, powders from the BT3-1 titanium alloy and the BK-15 hard alloy

were obtained and investigated. The proposal was put forward on a possibility of their industrial use, especially for surface spraying. The high-performance methods and appliances were suggested to obtain metal powders using an electric arc in the transverse hydrodynamic flow of the working fluid that burns without a pause. They make it possible to increase dispersion productivity in a fixed-bed layer by an order of magnitude and more as compared with the electro-erosive dispersion, as well as to reduce the number of terminal process waste (i.e. electrodes) by 4 to 6 times.

*Keywords:* electric arc, hydrodynamic flow, metal powder, methods and appliances.