

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202092993 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2021.04.06

(51) Int. Cl. B22F 9/14 (2006.01)  
H05H 1/26 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
2019.06.06

(54) СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОЧИСТЫХ  
СФЕРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ С БОЛЬШОЙ СКОРОСТЬЮ  
ПРОИЗВОДСТВА ИЗ ОДНОЙ ИЛИ ДВУХ ПРОВОЛОК

(31) 62/681,623

(72) Изобретатель:

(32) 2018.06.06

Пру Франсуа, Дорваль Дион

(33) US

Кристофер Алекс, Карабин Пьер (CA)

(86) PCT/CA2019/000081

(74) Представитель:

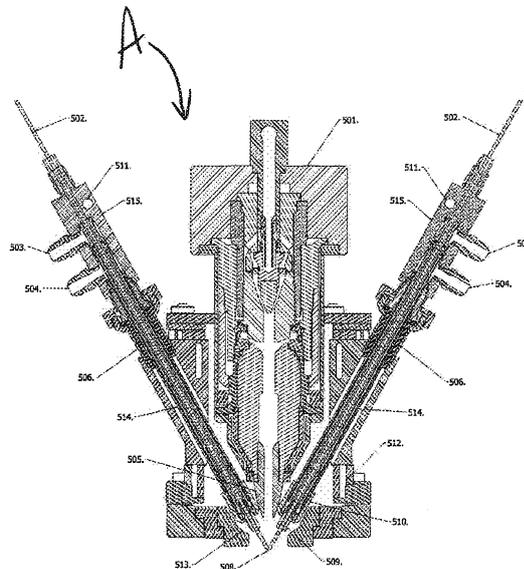
(87) WO 2019/232612 2019.12.12

Носырева Е.Л. (RU)

(71) Заявитель:

ПАЙРОДЖЕНИЗИС КЭНАДА ИНК.  
(CA)

(57) Настоящая заявка относится к способу плазменной атомизации и устройству для производства металлических порошков из сырья в виде по меньшей мере одной проволоки/стержня. В способе электрическую дугу применяют к сырью в виде по меньшей мере одной проволоки/стержня для его расплавления. Плазменную горелку используют для генерирования сверхзвукового плазменного пучка в вершине, в которой электрическая дуга передается сырью в виде по меньшей мере одной проволоки/стержня для атомизации расплавленного сырья в виде проволоки/стержня на частицы. Расположенная ниже по потоку камера охлаждения отверждает частицы с образованием металлических порошков. Во избежание образования сателлитов для предотвращения рециркуляции порошков используют диффузор, предотвращающий образование сателлитов. В устройстве, в котором поданы две проволоки, одна проволока выполняет функцию анода, а другая проволока выполняет функцию катода.



A1

202092993

202092993

A1

**СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОЧИСТЫХ  
СФЕРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ С БОЛЬШОЙ  
СКОРОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВА ИЗ ОДНОЙ ИЛИ ДВУХ ПРОВОЛОК**

**ПЕРЕКРЕСТНАЯ ССЫЛКА НА РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ**

**[0001]** Настоящая заявка испрашивает приоритет предварительной заявки на патент США № 62/681623, в настоящее время находящейся в процессе рассмотрения, поданной 6 июня 2018 г., которая включена в настоящий документ посредством ссылки.

**ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ**

**[0002]** Настоящее изобретение относится к материалам с улучшенными свойствами и, в частности, к производству металлических порошков для различных применений, таких как аддитивное производство для аэрокосмической и медицинской промышленности.

**ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ**

**[0003]** В плазменной атомизации в качестве сырья обычно используют проволоку, а в качестве атомизирующего агента для одновременного плавления и дробления частиц используют источник плазмы (также известный как плазменная горелка). Использование проволоки придает необходимую устойчивость, чтобы тонкие плазменные струи были надлежащим образом направлены на проволоку, поскольку плазменные струи должны расплавить проволоку и атомизировать ее за один этап. Насколько известно, по данной технологии в настоящее время производят наиболее тонкодисперсные, наиболее сферические и наиболее плотные порошки на рынке. Иными словами, выход порошков, произведенных в диапазоне 0–106 микрон, является очень высоким, сферичность почти безупречна, а захват газа сведен к минимуму.

**[0004]** Однако эта технология имеет главный недостаток, который заключается в том, что ее скорость производства являются относительно низкой по сравнению с водяной и газовой атомизацией, в связи с тем, что плазменная атомизация является

энергетически очень неэффективным способом. Зарегистрированная скорость производства для плазменной атомизации составляет от 0,6 до 13 кг/ч для Ti-6Al-4V. Однако правдоподобно предположить, что работа у верхней границы приведет к распределению по крупности более крупных частиц. Например, в патенте США №5707419, озаглавленном «Method of Production of Metal and Ceramic Powders by Plasma Atomization» и выданном на имя Tsantrizos и др. 13 января 1998 г., сообщается о скорости подачи титана, составляющей 14,7 г/мин, или 0,882 кг/ч, тогда как в публикации заявки на патент США №2017/0326649-A1, озаглавленной «Process and Apparatus for Producing Powder Particles by Atomization of a Feed Material in the Form of an Elongated Member», которая была опубликована 16 ноября 2017 г. с Boulos и др. как авторами изобретения, сообщалось о скорости подачи нержавеющей стали, составляющей 1,7 кг/ч.

**[0005]** Во всех трех существующих на сегодняшний день технологиях плазменной атомизации используются либо одна горелка для централизованной подачи [см. ссылку 4], либо три горелки, направленные на одну проволоку в центре [см. ссылки 1, 2 и 3]. В случае с технологией, основанной на трех горелках, тепло передается от плазменных факелов проволоке очень медленно, в порядке величины 0,4 %. Низкая эффективность теплопередачи подразумевает, что для поддержания определенной скорости подачи металла требуется большое количество плазменного газа, и это устанавливает нижний предел для отношения газа к металлу, что является стандартным показателем эффективности способа в атомизации. Также использование трех горелок означает, что с течением времени изнашивается много электродов, что может быть источником загрязнения и может увеличивать эксплуатационные издержки. В случае с горелкой для централизованной подачи используется горелка для индуктивно-связанной плазмы, для которой на рынке трудно приобрести источники энергии.

**[0006]** Дуговое напыление с использованием проволоки является проверенной и надежной технологией, которую используют в области термического напыления для нанесения покрытия на поверхности. Она по существу заключается в пропускании тока через одну или две проволоки и образовании электрической дуги между двумя проволоками или между одной проволокой и электродом. Высококачественные системы, основанные на дуге с использованием проволоки, могут работать с почти 100-

процентным коэффициентом использования с очень высокой производительностью (от ~20 до 50 кг/ч). Более того, эта технология является весьма энергосберегающей, поскольку дуга контактирует непосредственно с проволокой. Вместе с тем, целью этой технологии является получение покрытий, а не получение порошков. Поскольку в этой технологии для атомизации распыляемого материала используется холодный газ, получают очень неправильные и угловатые формы, что является нежелательным для многих применений.

**[0007]** Поэтому является желательным предоставление способа и устройства для производства металлических порошков из одной или двух проволок со значительной скоростью производства, при этом сохраняя качество, обеспечиваемое плазменной атомизацией, а именно тонкодисперсные, сферические и полностью плотные порошки.

### **СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ**

**[0008]** Таким образом, является желательным предоставление нового устройства и способа для производства металлических порошков со значительной скоростью из одного или двух проволок.

**[0009]** В вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлен в одном аспекте способ плазменной атомизации, включающий следующее:

**[00010]** термоплазменную горелку,

**[00011]** непрерывно подаваемые одну или две проволоки, подлежащие атомизации,

**[00012]** электрическую дугу, передаваемую проволоке или проволокам, подлежащим атомизации, и

**[00013]** процесс охлаждения, приспособленный для отверждения частиц в сферические порошки.

**[00014]** Также в варианте осуществления, описанном в настоящем документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и проволоку,

выполненную с возможностью подачи в плазменную горелку, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом дуга выполнена с возможностью образования между проволокой, выступающей в качестве катода, и электродом.

**[00015]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлен в другом аспекте способ плазменной атомизации, включающий следующее:

**[00016]** предоставление термоплазменной горелки,

**[00017]** непрерывную подачу одной или двух проволок, подлежащих атомизации,

**[00018]** приспособление электрической дуги для передачи проволоке или проволокам для получения частиц, и

**[00019]** предоставление охлаждения для отверждения частиц в сферические порошки.

**[00020]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и проволоку, выполненную с возможностью подачи в плазменную горелку, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом дуга выполнена с возможностью образования между проволокой, выступающей в качестве катода, и электродом.

**[00021]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и по меньшей мере одну проволоку, выполненную с возможностью подачи в устройство, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, и камеру охлаждения, выполненную с возможностью отверждения частиц в порошки, и при этом проволока выполнена с возможностью выполнения функции катода в плазменной горелке.

**[00022]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем

документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и по меньшей мере пару проволок, выполненных с возможностью подачи в устройство, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленных проволок на частицы, при этом одна из проволок выполнена с возможностью выполнения функции анода, тогда как другая проволока выполнена с возможностью выполнения функции катода.

**[00023]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и проволоку, выполненную с возможностью подачи в плазменную горелку, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом дуга выполнена с возможностью образования между проволокой, выступающей в качестве катода, и электродом.

**[00024]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и по меньшей мере одну проволоку, выполненную с возможностью подачи в плазменную горелку, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом устройство выполнено с возможностью охлаждения газом, тем самым нагревая газ, причем нагретый таким образом газ выполнен с возможностью использования в качестве плазменного газа.

**[00025]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлен в другом аспекте способ плазменной атомизации, включающий следующее:

**[00026]** предоставление термоплазменной горелки,

**[00027]** непрерывную подачу одной или двух проволок, подлежащих атомизации, тем самым получая из них атомизированные металлические капельки, и

**[00028]** пропускание капелек через диффузор, предотвращающий образование сателлитов, который выполнен с возможностью предотвращения рециркуляции

тонкодисперсных порошков и тем самым образования сателлитов.

**[00029]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлен в другом аспекте способ плазменной атомизации, включающий следующее:

**[00030]** предоставление термоплазменной горелки,

**[00031]** предоставление одной или двух проволок, подлежащих атомизации, и

**[00032]** предоставление параллельно по меньшей мере двух источников питания для управления дугой между двумя проволоками или между одной проволокой и одним электродом плазменной горелки, тем самым получая частицы.

### **КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**[00033]** Для лучшего понимания вариантов осуществления, описанных в данном документе, и для более наглядной демонстрации того, как они могут быть реализованы, далее исключительно для примера будет осуществлена ссылка на прилагаемые графические материалы, на которых показан по меньшей мере один примерный вариант осуществления и на которых:

**[00034]** на фиг. 1 и фиг. 2 представлены виды в вертикальном разрезе устройства для производства металлических порошков из пары проволок с использованием дуговой плазменной атомизации с использованием двух проволок в соответствии с примерным вариантом осуществления;

**[00035]** на фиг. 3 представлена схематическая вертикальная проекция системы для производства металлических порошков, в которой используется устройство, показанное на фиг. 1 и фиг. 2, в соответствии с примерным вариантом осуществления, включая тот, который показан на фиг. 1 и фиг. 2;

**[00036]** на фиг. 4 представлено концептуальное схематическое изображение электрической конфигурации, используемой в соответствии с примерным вариантом осуществления, включая тот, который показан на фиг. 1 и фиг. 2;

[00037] на фиг. 5 показан пример электрических линий тренда согласно вариантам осуществления при работе настоящего изобретения;

[00038] на фиг. 6 представлено изображение, выполненное с помощью сканирующего электронного микроскопа, со 100-кратным увеличением, порошка из Ti64 размером 45–106 мкм марки 23, полученного с помощью варианта осуществления, показанного на фиг. 1 и фиг. 2;

[00039] на фиг. 7 представлено изображение, выполненное с помощью сканирующего электронного микроскопа, со 100-кратным увеличением, порошка из циркония размером 20–120, полученного с помощью варианта осуществления, показанного на фиг. 1 и фиг. 2;

[00040] на фиг. 8 показан обычный график распределения крупности порошка согласно лазерной дифракции для сырого порошка, полученного с помощью по меньшей мере одного варианта осуществления, раскрытого в настоящем документе;

[00041] на фиг. 9 представлен схематический вид в вертикальном разрезе устройства для производства металлических порошков из одной проволоки с использованием плазменной горелки, которая может передавать дугу, с указанной одной проволокой в соответствии с примерным вариантом осуществления; и

[00042] на фиг. 10 представлен схематический вид в вертикальном разрезе устройства для производства металлических порошков из одной проволоки с использованием плазменной горелки для централизованной подачи в соответствии с примерным вариантом осуществления.

## **ОПИСАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

[00043] В настоящем подходе, раскрытом в настоящем документе, предоставлены способы и устройства для производства металлических порошков путем объединения признаков вышеописанной плазменной атомизации и технологий дугового напыления с использованием проволоки, включая использование некоторых из принципов технологии дугового напыления с использованием проволоки и их приспособление под производство высокочистых сферических порошков. Более конкретно, струю газа

заменяют источником плазмы, и расплавленную проволоку атомизируют в камере охлаждения, как видно в способах атомизации.

**[00044]** Одним ключевым вопросом, принимаемым во внимание, является качество порошка. Система, основанная на дуге с использованием проволоки, не была разработана для производства порошка высокого качества и поэтому должна быть отрегулирована и приспособлена под качество порошка. В настоящем изобретении предусмотрена стратегия управления, которая улучшает устойчивость процесса плавления, что далее будет описано более подробно.

**[00045]** Источник плазмы (такой как одна или несколько плазменных горелок или электрическая дуга) выдает плазменный пучок, который может быть ускорен до сверхзвуковой скорости до и после столкновения с расплавленным потоком с высоким импульсом.

**[00046]** В настоящих вариантах осуществления источник сверхзвуковой струи плазмы получают посредством дуговой плазменной горелки потому, что она является широкодоступной. Вместе с тем, для достижения той же самой сверхзвуковой струи плазмы могут быть использованы много других путей. Например, также могут быть использованы любые источники термической плазмы, такие как источники индуктивно-связанной плазмы и микроволновой плазмы.

**[00047]** **Пример 1: Дуговая плазменная атомизация с использованием двух проволок (Главный вариант осуществления)**

**[00048]** Ниже подробно описан главный вариант осуществления.

**[00049]** Преимущества использования этого варианта осуществления по сравнению с известной технологией (ссылочный документ 2) представлены в Таблице 1. В ней продемонстрированы явные преимущества использования настоящего объекта изобретения по сравнению с технологией по ссылочному документу 2.

**Таблица 1:**

<b><u>Ключевые</u></b> <b><u>показатели (для</u></b>	<b><u>Известный</u></b> <b><u>уровень техники</u></b>	<b><u>Настоящее</u></b> <b><u>изобретение</u></b>

<b><u>Ti64)</u></b>	<b><u>(Ссылочный документ 2)</u></b>	
Скорость производства (кг/ч)	5	28
Отношение газа к металлу	26	5,5
Время от остановки до пуска (ч)	2	0,5
Удельная мощность (кВт-ч/кг) для Ti64	31,2	4
Тепловой коэффициент полезного действия (%)	1,11	8,75

**[00050]** Рекомендуемый эксплуатационный режим для главного варианта осуществления раскрыт в Таблице 2 для двух материалов, а именно Ti64 марки 23 и циркония.

**Таблица 2:**

<b><u>Материал</u></b>	<b><u>Ti-6Al-4V марки 23</u></b>	<b><u>Цирконий</u></b>
Обозначение #	TA-015	ZH-006
Скорость производства (кг/ч)	28	23,7

Мощность горелки (кВт)	90	94
Поток плазменного газа (ст. л./мин)	890	937
Поток защитного газа горелки (ст. л./мин)	260	200
Главный поток защитного газа (ст. л./мин)	400	400
Диаметр проволоки (мм)	3,175	3,175
Полный ток дуги при использовании проволоки (А)	740	515
Заданное напряжение дуги при использовании проволоки (V)	30	26
Эффективность плавления посредством дуги при использовании проволоки (%)	44	37

**[00051]** Рабочие характеристики двух продуктов, сгенерированных посредством главного варианта осуществления, раскрыты в Таблице 3, причем два продукта представляют собой TA-015-EK-01 и ZH-006-FQ-01, которые соответствуют Ti64 20–63 мкм и Zr 20–120 мкм соответственно.

**Таблица 3:**

Название продукта	TA-015-EK-01	ZH-006-FQ-01
Материал и крупность	Ti64 20-63 мкм	Zr 20-120 мкм
Выход (%)	32	64

Объемная плотность (г/см <sup>3</sup> )	2,42	3,98
Насыпная плотность (г/см <sup>3</sup> )	2,7	Не измеряется
Расход по Холлу (с/50г)	25,91	15,42
Алюминий (%)	6,4	Не применимо
Ванадий (%)	4	Не применимо
Кислород (м.д.)	1000	1500

**[00052]** На фиг. 1 подробно показаны конкретные компоненты, которые составляют устройство А. Эти компоненты включают плазменную горелку 501 с высоким расходом и сверхзвуковое сопло 505 со встроенным анодом, которое испускает атомизирующую струю на пару проволок 502, подаваемых по направлению к вершине 508, вследствие чего электрическая дуга передается от одной проволоки другой проволоке. Этот электрический ток обеспечивает энергию, необходимую для непрерывного плавления проводящего непрерывно подаваемого сырья. Ток пропускают на проволоки 502 с помощью токоподводящих наконечников 509, которые изготовлены из сплава высокой проводимости, например медноциркониевого сплава, который обладает хорошей износостойкостью при высоких температурах.

**[00053]** Керамический наконечник 510 обеспечивает электроизоляцию контактора 514 с водяным охлаждением от корпуса реактора через сопло 513 для защитного газа и сверхзвукового сопла 505 горелки. Сильное тепло, излучаемое плазменной горелкой 501 и передаваемая дуга требуют того, чтобы контакторы были с водяным охлаждением, тогда как сам токоподводящий наконечник представляет собой заменяемый расходный материал. Собственно вода поступает в 503 в коллектор 515 контактора сзади и направляется к наконечнику, где она возвращается снова вверх и выходит через выход 504. Электроэнергия подается в систему передаваемой дуги посредством коллекторов через крепление 511 монтажного лепестка.

**[00054]** На фиг. 2 показан вид в перпендикулярном срезе устройства А, где плазменная горелка с высоким расходом испускает атомизирующую струю

посредством сверхзвукового сопла 605 в вершине 608 проволоки. Здесь защитный газ нагнетают в реактор в 602 для заполнения полости, окружающей сопло горелки и контакторы 607 с водяным охлаждением. Этот защитный газ выводят посредством сопла 606 для защитного газа в реактор, окружающий электрическую дугу между проволоками. Этот защитный газ служит нескольким целям, например, он предотвращает обратный поток порошков и горячих газов, а также помогает поддерживать дугу в сверхзвуковом факеле. Смешивающийся газ течет, и затем расплавленные атомизированные капельки металла на высокой скорости направляются в камеру осаждения реактора посредством диффузора 610, предотвращающего образование сателлитов. Зона рециркуляции вокруг струи с высокой скоростью, где могут накапливаться во взвешенном состоянии тонкодисперсные порошки, является главной причиной сателлитов в порошках, атомизированных плазмой, поскольку новые капельки направляются через облако мелкозернистых частиц, которые таким образом прикрепляются к поверхности. Диффузор 610 устраняет подавляющее большинство таких случаев, тем самым значительным образом снижая образование сателлитов. Ресивер 611 горелки имеет водяное охлаждение, как и рубашка реактора, вода поступает с впускного отверстия 603 внизу и выпускного отверстия 604 наверху.

**[00055]** На фиг. 3 схематически изображена система S, выполненная с возможностью производства металлических порошков и осуществляющая одно из устройств A, A' и A'', соответственно показанных на фиг. 1–2, фиг. 9 и фиг. 10. Более конкретно, система S содержит устройства A, A' или A'' для атомизации на основе плазмы с использованием двух проволок или одной проволоки. Система S показана конкретно в конфигурации A с дугой с использованием двух проволок с расположенной по центру плазменной горелкой 301 с высоким расходом и двумя (2) сервоуправляемыми механизмами 302 подачи проволоки. Зона 303 атомизации содержит передаваемую дугу между одной или двумя проволоками, поток защитного газа и плазменной горелки и направляется в реактор посредством диффузора 304, предотвращающего образование сателлитов. Реактор состоит из камеры 305 осаждения, где происходят сфероидизация и отверждение, и рубашки 306 с водяным охлаждением для поддержания постоянной скорости охлаждения в камере 305 для порошков. Порошки затем увлекаются пневматическим конвейером 307 в циклонный сепаратор 308, где порошки насыпью осаждаются в сборной емкости 309. Для сбора во время непрерывной работы для изолирования емкости 309 используется клапан 310. Аргон

затем удаляется из системы через блок 311 фильтрации для того, чтобы слишком тонкодисперсные порошки осаждались в циклонном сепараторе 308.

**[00056]** В настоящих вариантах осуществления проволоки 502 (фиг. 1), 110 (фиг. 10) и 405 (фиг. 9) могут быть изготовлены из различных проводящих материалов, таких как титан, цирконий, медь, олово, алюминий, вольфрам, углеродистая сталь, нержавеющая сталь и т. д., и их сплавов.

**[00057]** Для обеспечения устойчивости системы, основанной на дуге с использованием проволоки, для атомизации в системе необходимо управлять 2 из 3 параметров, а именно напряжения, тока и скорости подачи. Необходимо, чтобы эти три параметра достигли устойчивого состояния в равновесии, чтобы считаться находящимися в непрерывной работе. В устойчивом состоянии расстояние между проволокой, длина дуги и мощность становятся постоянными. Для достижения этого устойчивого состояния можно использовать несколько конфигураций, таких как:

**[00058]** Постоянная скорость подачи проволоки, один источник питания в режиме управления напряжением, один источник питания в режиме управления током (главный вариант осуществления);

**[00059]** Постоянная скорость подачи проволоки, один или несколько источников питания с управлением напряжением. Эта конфигурация является функциональной, но ток является весьма неустойчивым, что оказывает негативное влияние на распределение частиц по крупности и однородность продукта. Кроме того, она является очень требовательной к обоим источникам питания;

**[00060]** Источники питания с управлением током, переменная скорость подачи проволоки. Эту конфигурацию еще предстоит испытать, но теоретически она является рабочей.

**[00061]** Было обнаружено, что постоянная скорость подачи проволоки, смешанные источники питания с управлением током/напряжением являются наиболее подходящими для настоящей заявки. На фиг. 4 концептуально показано, как работает главный вариант осуществления для достижения результатов, показанных в настоящем изобретении.

**[00062]** Благодаря использованию серводвигателя возможно достичь очень точных и постоянных скоростей подачи.

**[00063]** Использование параллельно двух источников питания, одного в режиме управления напряжением и другого в режиме управления током, является ключевым фактором для достижения устойчивой конфигурации. Поскольку два источника питания используются параллельно, источник питания с управлением напряжением будет заставлять устанавливать одинаковое напряжение для обоих источников питания. Это исключает другую переменную. Для добавления еще одного слоя устойчивости другой источник питания устанавливают в режим управления током с относительно высокой уставкой по току (около  $2/3$  общего требуемого тока), что помогает создать базовую линию тока.

**[00064]** Единственной переменной в способе является часть общего тока, которая должна меняться для того, чтобы позволить другим параметрам оставаться постоянными (степень свободы). Поэтому источник питания с управлением напряжением предоставляет дополнительный ток, являющийся переменным, для дополнения того, чтобы является недостающим в токе, уже предоставленном источником питания с управлением током, для плавления надлежащего количества металла, чтобы система оставалась в устойчивом состоянии.

**[00065]** Например, если предположить, что для плавления определенного металла при определенной скорости подачи требуется 20 кВт, если источником питания с управлением напряжением установлено напряжение 30 В, источники питания должны обеспечить подачу 667 А. Если источник питания с управлением током установлен на 400 А, источник питания с управлением напряжением будет колебаться вокруг 267 А с незначительными пульсациями. Это остающееся колебание требуется для поддержания системы в устойчивом состоянии путем компенсации против всех других источников изменчивости, таких как изменение диаметра проволоки, колебания расхода аргона, изменчивость длины дуги, схема повторного зажигания дуги, механическая вибрация проволоки, микроколебания скорости подачи проволоки и т. д.

**[00066]** На фиг. 5 показаны электрические линии тренда, зарегистрированные для главного варианта осуществления во время работы с использованием предлагаемой в настоящем документе стратегии электрического управления. Вкратце, на ней показано,

что все переменные являются очень устойчивыми, за исключением тока источника питания с управлением напряжением, по причинам, которые пояснялись выше.

**[00067]** Как показано на фиг. 5, такая устойчивая работа позволяет производить очень сферические порошки, как показано на фиг. 6 и фиг. 7 для Ti64 и циркония соответственно.

**[00068]** На фиг. 8 показана обычная кривая распределения частиц по крупности для порошка, произведенного с использованием главного варианта осуществления со стратегией электрического управления, которая поясняется в настоящем документе.

**[00069]** Хотя представленное в настоящем документе управление током упоминалось и было испытано конкретно для главного варианта осуществления, та же самая стратегия управления будет применимой также к другим представленным вариантам осуществления.

**[00070]      **Пример 2: Дуговая плазменная атомизация с использованием одной проволоки****

**[00071]** Во втором примере, показанном на фиг. 9, также раскрыто устройство A' для производства металлических порошков из сырья в виде проводящей проволоки, при этом проволока 405 централизованно подана вдоль стрелки 409 спереди передаваемой плазменной горелки 401, оснащенной сверхзвуковым соплом 411, где между проволокой 405 и одним электродом 402 образуется дуга 403. Путем вставки проводящей проволоки 405 через направляющую 407 для проволоки спереди плазменной горелки 401 посредством передаваемой дуги можно очень эффективно расплавлять саму проволоку 405. Оставшуюся энергию затем используют для нагрева инертного газа (например, аргона), подаваемого посредством предварительно нагреваемого газового канала 404, до состояния плазмы, и этот газ затем ускоряют через сверхзвуковое сопло 411. Это ускорение газа-носителя дополнительно атомизирует капельки металла путем их измельчения. Частицы затем отверждают с образованием маленьких сферических частиц в камере охлаждения (как показано в качестве примера на фиг. 3), например, заполненной инертным газом (например, аргоном). Позиционным обозначением 408 показан плазменный факел.

**[00072]      Пример 3: Дуговая плазменная атомизация с использованием одной централизованно подаваемой проволоки**

**[00073]**      В третьем примере, показанном на фиг. 10, также раскрыто устройство А” для производства металлических порошков из сырья в виде проводящей проволоки, при этом проволока 110 централизованно подана вдоль стрелки 111 в плазменную горелку 112, где между проволокой 110, выполняющей функцию катода, и одним электродом (смотрите анод 114) образуется дуга 128. Путем вставки проводящей проволоки 110 через направляющую 116 для проволоки плазменной горелки 112 посредством передаваемой дуги можно очень эффективно расплавлять саму проволоку 110. Этот способ выделяется тем, что представляет возможность увеличения масштабов в том плане, что проволоку можно самым целесообразным образом заменить на стержень или заготовку диаметром до 2,5 дюйма. Направляющая 116 для проволоки может быть увеличена вдвое в качестве катода зажигания. Оставшуюся энергию затем используют для нагрева инертного газа (например, аргона), подаваемого посредством предварительно нагреваемого газового канала 118, до состояния плазмы, и этот газ затем ускоряют через сверхзвуковое сопло 120. Это ускорение газа-носителя дополнительно атомизирует капельки металла путем их измельчения. Частицы затем отверждают с образованием маленьких сферических частиц в камере охлаждения (как показано в качестве примера на фиг. 3), например, заполненной инертным газом (например, аргоном). Позиционным обозначением 122 показан плазменный факел.

**[00074]**      В вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлено в одном аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и одну или две проволоки, выполненные с возможностью подачи в устройство, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, и камеру охлаждения, выполненную с возможностью отверждения частиц в порошок, и при этом проволока выполнена с возможностью выполнения функции катода в плазменной горелке.

**[00075]**      Также в варианте осуществления, описанном в настоящем документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и пару проволок, выполненных с возможностью подачи в устройство, причем плазменная горелка

выполнена с возможностью атомизации расплавленных проволок на частицы, при этом одна из проволок выполнена с возможностью выполнения функции анода, тогда как другая проволока выполнена с возможностью выполнения функции катода.

**[00076]** Более того, вариант осуществления включает стратегию электрического управления, которая обеспечивает возможность бесперебойной и устойчивой работы указанного варианта осуществления.

**[00077]** Кроме того, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и проволоку, выполненную с возможностью подачи в устройство, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом дуга выполнена с возможностью образования между проволокой, выступающей в качестве катода, и электродом горелки.

**[00078]** Наконец, в вариантах осуществления, описанных в настоящем документе, предоставлено в другом аспекте устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и по меньшей мере одну проволоку, выполненную с возможностью централизованной подачи внутри плазменной горелки, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом дуга выполнена с возможностью образования между проволокой, выступающей в качестве катода, и электродом в горелке.

**[00079]** Несмотря на то, что вышеизложенное описание предоставляет примеры вариантов осуществления, следует понимать, что некоторые признаки и/или функции описанных вариантов осуществления поддаются модификации без отступления от сущности и принципов работы описанных вариантов осуществления. Соответственно, все, что было описано выше, было предназначено для пояснения вариантов осуществления, а не ограничения, и специалистам в данной области техники будет понятно, что другие изменения и модификации могут быть выполнены без отступления от объема вариантов осуществления, как определено в прилагаемой к настоящему документу формуле изобретения.

## **ССЫЛОЧНЫЕ ДОКУМЕНТЫ**

- [1] Peter G. Tsantrizos, François Allaire и Majid Entezarian, «Method of Production of Metal and Ceramic Powders by Plasma Atomization», патент США № 5707419 от 13 января 1998 г.
- [2] Christopher Alex Dorval Dion, William Kreklewetz и Pierre Carabin, «Plasma Apparatus for the Production of High-Quality Spherical Powders at High Capacity», публикация PCT № WO 2016/191854 A1 от 8 декабря 2016 г.
- [3] Michel Drouet, «Methods and Apparatuses for Preparing Spheroidal Powders», публикация PCT № WO 2011/054113 A1 от 12 мая 2011 г.
- [4] Maher I. Boulos, Jerzy W. Jurewicz и Alexandre Auger, «Process and Apparatus for Producing Powder Particles by Atomization of a Feed Material in the Form of an Elongated Member», публикация заявки на патент США №2017/0326649 A1 от 16 ноября 2017 г.
- [5] Pierre Fauchais, Joachim Heberlein и Maher Boulos, «Thermal Spray Fundamentals – From Powder to Part», стр. 577–605, Springer, Нью-Йорк, 2014.

**ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ**

1. Способ плазменной атомизации, включающий:
  - термоплазменную горелку,
  - непрерывно подаваемые одну или две проволоки, подлежащие атомизации,
  - электрическую дугу, передаваемую проволоке или проволокам, подлежащим атомизации, и
  - процесс охлаждения, приспособленный для отверждения частиц в сферические порошки.
2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что плазменная горелка оснащена сверхзвуковым соплом.
3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что электрическая дуга передается проволокам в вершине в сверхзвуковом потоке плазменной горелки.
4. Способ по любому из пп. 1–3, отличающийся тем, что атомизированные металлические капельки проходят через диффузор, предотвращающий образование сателлитов, который выполнен с возможностью предотвращения рециркуляции тонкодисперсных порошков и тем самым образования сателлитов.
5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что для управления дугой между двумя проволоками или между одной проволокой и одним электродом горелки используют параллельно два или более источника питания.
6. Способ по любому из пп. 1–5, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник питания для дуги с использованием проволоки имеет управление напряжением.
7. Способ по любому из пп. 1–6, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник питания для дуги с использованием проволоки имеет управление током.
8. Способ по любому из пп. 1–7, отличающийся тем, что одновременно используются параллельные источники питания в комбинации режимов управления напряжением и управления током.

9. Устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и проволоку, выполненную с возможностью подачи в плазменную горелку, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом дуга выполнена с возможностью образования между проволокой, выступающей в качестве катода, и электродом.

10. Устройство по п. 9, отличающееся тем, что проволока централизованно подана в плазменную горелку.

11. Устройство по любому из пп. 9 и 10, отличающееся тем, что предоставлено сверхзвуковое сопло, и при этом в сверхзвуковом сопле сгенерирована электрическая дуга.

12. Устройство по любому из пп. 9–11, отличающееся тем, что сырье в виде проволоки заменено на стержень или заготовку, имеющую диаметр от 0,25 дюйма до 2,5 дюйма.

13. Устройство по любому из пп. 9–12, отличающееся тем, что для отверждения частиц с образованием сферических порошков ниже по потоку от плазменной горелки предусмотрена камера охлаждения.

14. Способ плазменной атомизации, включающий:

- предоставление термоплазменной горелки,
- непрерывную подачу одной или двух проволок, подлежащих атомизации,
- приспособление электрической дуги для передачи проволоке или проволокам для получения частиц, и
- предоставление охлаждения для отверждения частиц в сферические порошки.

15. Способ по п. 14, отличающийся тем, что плазменную горелку снабжают сверхзвуковым соплом.

16. Способ по п. 14, отличающийся тем, что электрическая дуга выполнена с возможностью передачи проволокам в вершине в сверхзвуковом потоке плазменной горелки.
17. Способ по любому из пп. 14–16, отличающийся тем, что атомизированные металлические капельки проходят через диффузор, предотвращающий образование сателлитов, который выполнен с возможностью предотвращения рециркуляции тонкодисперсных порошков и тем самым образования сателлитов.
18. Способ по п. 14, отличающийся тем, что для управления дугой между двумя проволоками или между одной проволокой и одним электродом плазменной горелки используют параллельно по меньшей мере два источника питания.
19. Способ по любому из пп. 14–18, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник питания для дуги с использованием проволоки имеет управление напряжением.
20. Способ по любому из пп. 14–19, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник питания для дуги с использованием проволоки имеет управление током.
21. Способ по любому из пп. 14–20, отличающийся тем, что одновременно используются параллельные источники питания в комбинации режимов управления напряжением и управления током.
22. Устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и проволоку, выполненную с возможностью подачи в плазменную горелку, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом дуга выполнена с возможностью образования между проволокой, выступающей в качестве катода, и электродом.
23. Устройство по п. 22, отличающееся тем, что проволока централизованно подана в плазменную горелку.
24. Устройство по любому из пп. 22 и 23, отличающееся тем, что предоставлено сверхзвуковое сопло, и при этом в сверхзвуковом сопле сгенерирована электрическая дуга.

25. Устройство по любому из пп. 22–24, отличающееся тем, что сырье в виде проволоки принимает форму стержня или заготовки, имеющей диаметр от 0,25 дюйма до 2,5 дюйма.
26. Устройство по любому из пп. 22–25, отличающееся тем, что для отверждения частиц с образованием сферических порошков ниже по потоку от плазменной горелки предусмотрена камера охлаждения.
27. Устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и по меньшей мере одну проволоку, выполненную с возможностью подачи в устройство, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, и камеру охлаждения, выполненную с возможностью отверждения частиц в порошки, и при этом проволока выполнена с возможностью выполнения функции катода в плазменной горелке.
28. Устройство по п. 27, отличающееся тем, что плазменный пучок, выдаваемый плазменной горелкой, выполнен с возможностью ускорения до сверхзвуковой скорости с образованием сверхзвуковой струи.
29. Устройство по любому из пп. 27–28, отличающееся тем, что предоставлено сверхзвуковое сопло, и при этом проволока выполнена с возможностью подачи в сверхзвуковое сопло либо до, либо после горловины сверхзвукового сопла.
30. Устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и по меньшей мере пару проволок, выполненных с возможностью подачи в устройство, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленных проволок на частицы, при этом одна из проволок выполнена с возможностью выполнения функции анода, тогда как другая проволока выполнена с возможностью выполнения функции катода.
31. Устройство по п. 30, отличающееся тем, что для отверждения частиц с образованием порошков ниже по потоку от плазменной горелки предусмотрена камера охлаждения.

32. Устройство по любому из пп. 30–31, отличающееся тем, что плазменный пучок, выдаваемый плазменной горелкой, выполнен с возможностью ускорения до сверхзвуковой скорости с образованием сверхзвуковой струи.
33. Устройство по п. 32, отличающееся тем, что предоставлено сверхзвуковое сопло, и при этом проволоки выполнены с возможностью подачи в сверхзвуковое сопло либо до, либо после горловины сверхзвукового сопла.
34. Устройство по любому из пп. 30–33, отличающееся тем, что предоставлен источник питания, и он выполнен с возможностью заставлять ток протекать через проволоки, причем между двумя проволоками сгенерирована электрическая дуга.
35. Устройство по п. 33, отличающееся тем, что предоставлен источник питания, и он выполнен с возможностью заставлять ток протекать через проволоки, причем между двумя проволоками и в сверхзвуковом сопле сгенерирована электрическая дуга.
36. Устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и проволоку, выполненную с возможностью подачи в плазменную горелку, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом дуга выполнена с возможностью образования между проволокой, выступающей в качестве катода, и электродом.
37. Устройство по п. 36, отличающееся тем, что проволока централизованно подана в плазменную горелку.
38. Устройство по любому из пп. 36–37, отличающееся тем, что для проволоки предоставлена направляющая для проволоки, благодаря чему путем вставки проволоки через направляющую для проволоки посредством передаваемой дуги можно эффективно расплавлять проволоку.
39. Устройство по п. 38, отличающееся тем, что направляющая для проволоки выполнена с возможностью увеличения вдвое в качестве катода зажигания.
40. Устройство по любому из пп. 36–39, отличающееся тем, что предоставлено сверхзвуковое сопло, и при этом в сверхзвуковом сопле сгенерирована электрическая дуга.

41. Устройство по любому из пп. 36–40, отличающееся тем, что для отверждения частиц с образованием порошков ниже по потоку от плазменной горелки предусмотрена камера охлаждения.
42. Устройство для производства металлических порошков из сырья в виде проволоки, содержащее плазменную горелку и по меньшей мере одну проволоку, выполненную с возможностью подачи в плазменную горелку, причем плазменная горелка выполнена с возможностью атомизации расплавленной проволоки на частицы, при этом устройство выполнено с возможностью охлаждения газом, тем самым нагревая газ, причем нагретый таким образом газ выполнен с возможностью использования в качестве плазменного газа.
43. Устройство по п. 42, отличающееся тем, что газ включает инертный газ, такой как аргон.
44. Устройство по любому из пп. 42–43, отличающееся тем, что для подачи газа в плазменную горелку предоставлен газовый канал.
45. Устройство по любому из пп. 42–44, отличающееся тем, что предоставлено сверхзвуковое сопло, причем газ выполнен с возможностью ускорения через сверхзвуковое сопло и измельчения частиц.
46. Устройство по любому из пп. 42–45, отличающееся тем, что для отверждения частиц с образованием порошков ниже по потоку от плазменной горелки предусмотрена камера охлаждения.
47. Устройство по любому из пп. 42–43, отличающееся тем, что предоставлен газовый канал, при этом газ выполнен с возможностью нагрева прежде, чем он войдет в контакт с электрической дугой, предоставленной на переднем конце проволоки.
48. Устройство по любому из пп. 27, 31, 41 и 46, отличающееся тем, что камера охлаждения содержит инертный газ, такой как аргон.
49. Способ плазменной атомизации, включающий:
- предоставление термоплазменной горелки,

- непрерывную подачу одной или двух проволок, подлежащих атомизации, тем самым получая из них атомизированные металлические капельки, и
- пропускание капелек через диффузор, предотвращающий образование сателлитов, который выполнен с возможностью предотвращения рециркуляции тонкодисперсных порошков и тем самым образования сателлитов.

50. Способ плазменной атомизации, включающий:

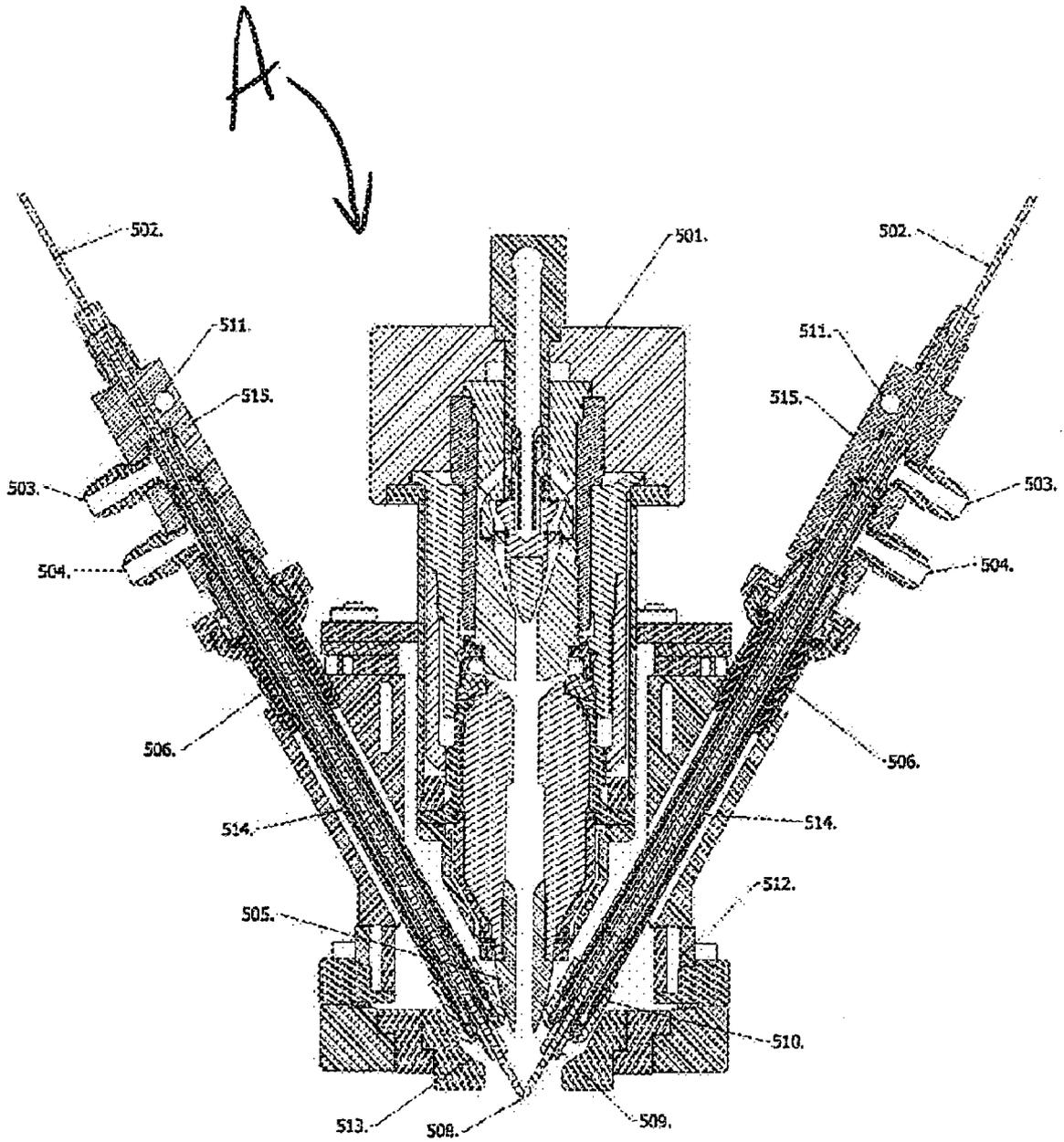
- предоставление термоплазменной горелки,
- предоставление одной или двух проволок, подлежащих атомизации, и
- предоставление параллельно по меньшей мере двух источников питания для управления дугой между двумя проволоками или между одной проволокой и одним электродом плазменной горелки, тем самым получая частицы.

51. Способ по п. 50, отличающийся тем, что для управления дугой между двумя проволоками или между одной проволокой и одним электродом плазменной горелки используют параллельно по меньшей мере два источника энергии.

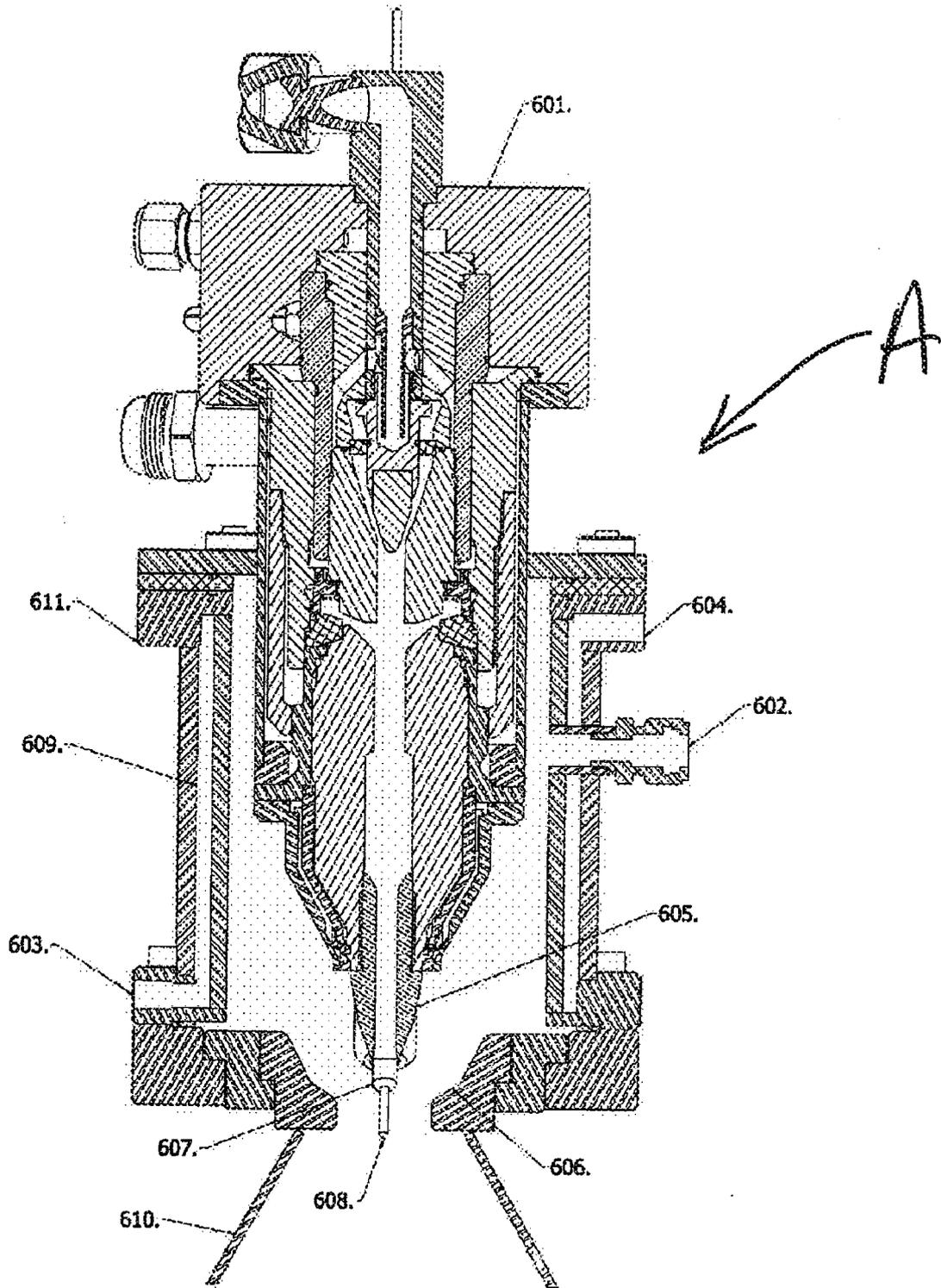
52. Способ по любому из пп. 50–51, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник питания для дуги с использованием проволоки имеет управление напряжением.

53. Способ по любому из пп. 50–52, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник питания для дуги с использованием проволоки имеет управление током.

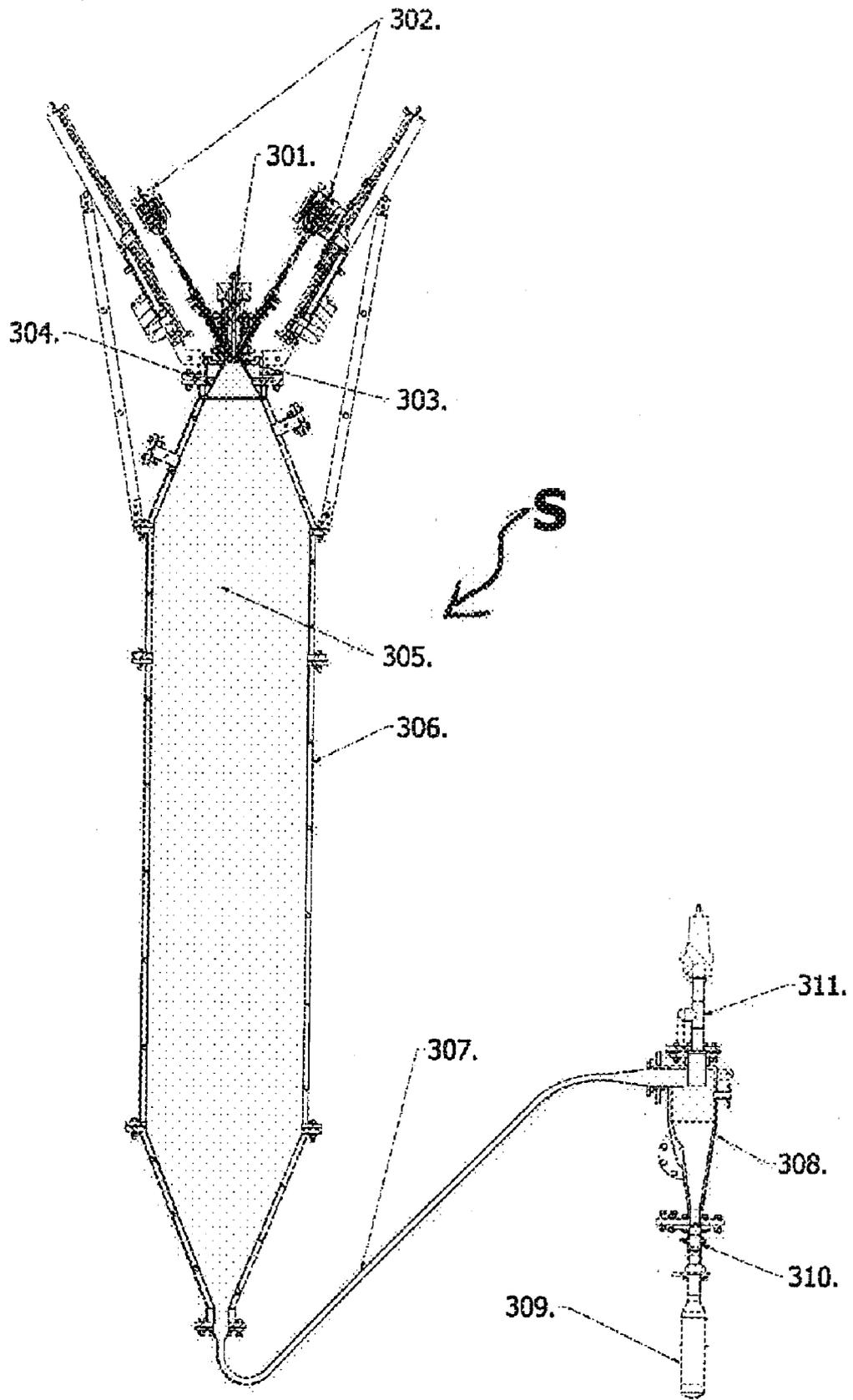
54. Способ по любому из пп. 50–53, отличающийся тем, что одновременно используются параллельные источники питания в комбинации режимов управления напряжением и управления током.



Фиг. 1

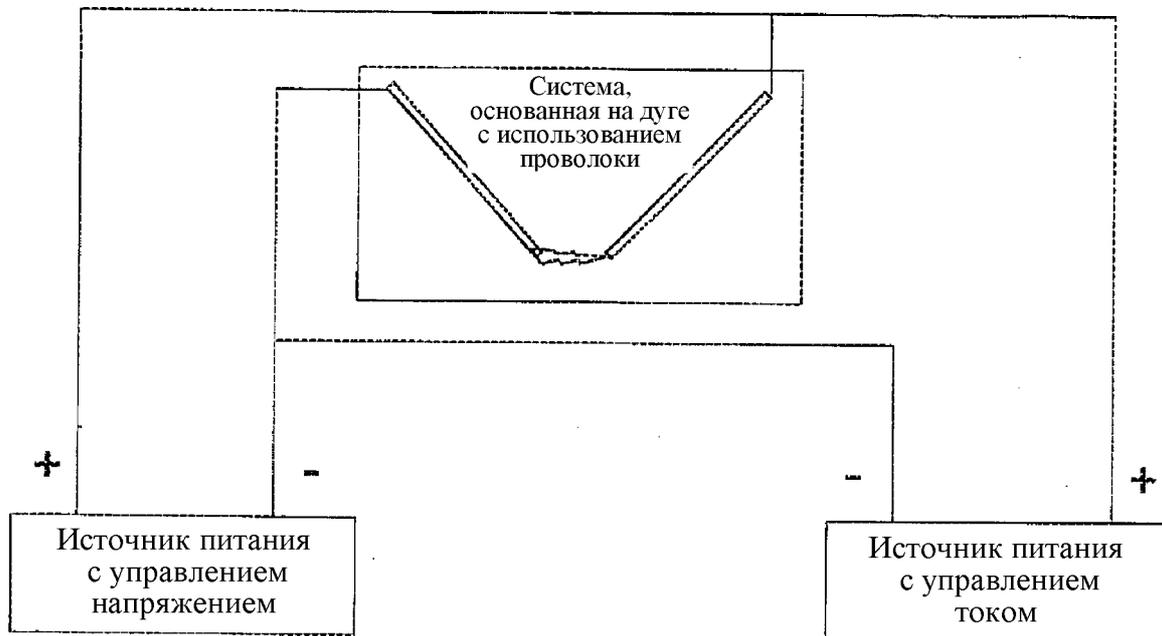


Фиг. 2

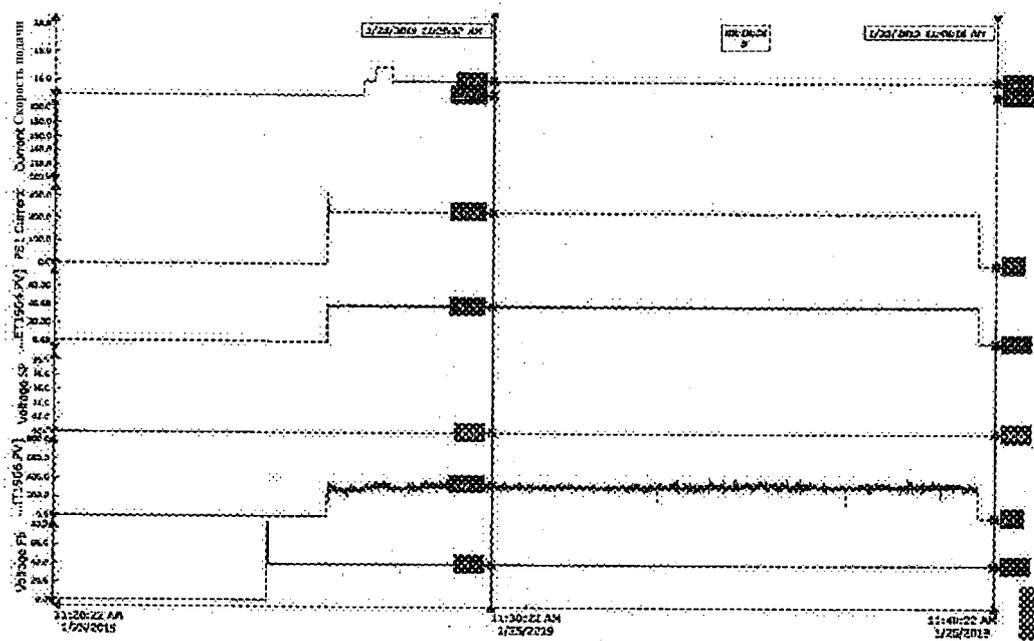


Фиг. 3

## Смешанная конфигурация с управлением током/напряжением



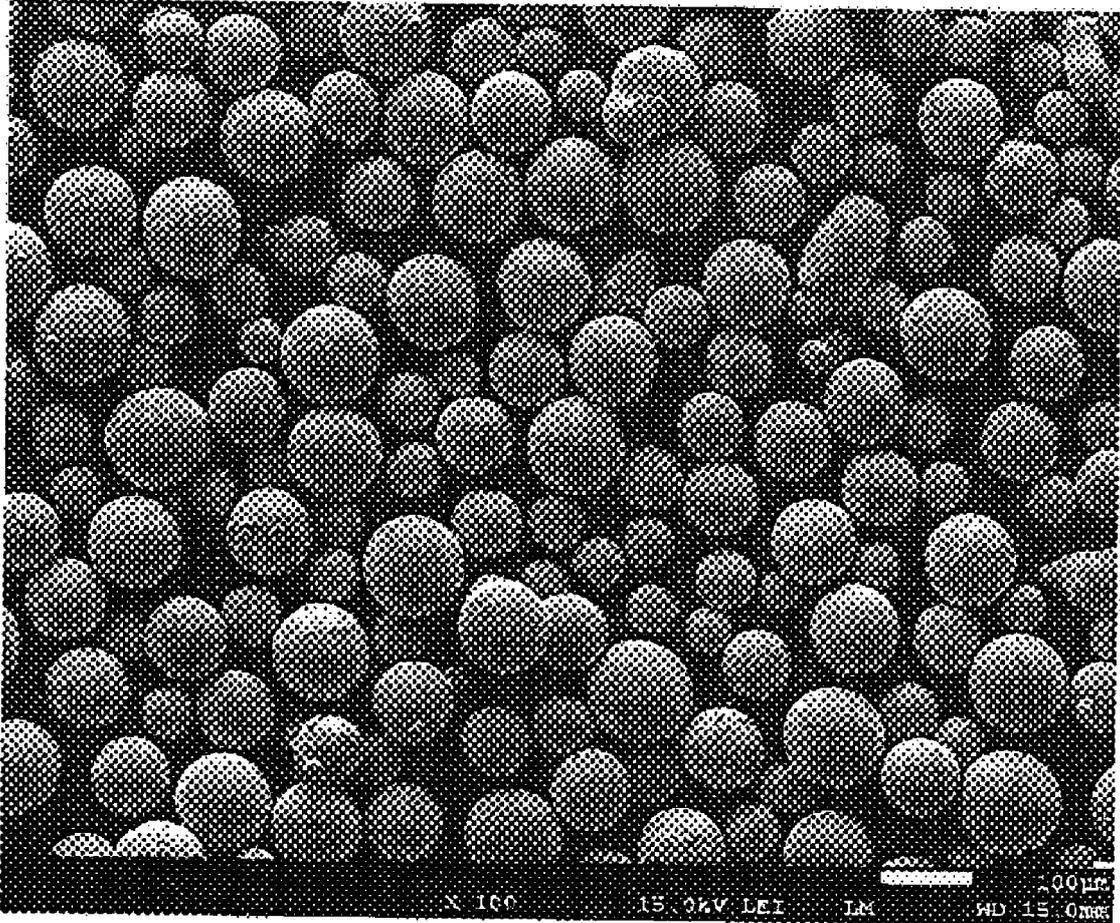
Фиг. 4



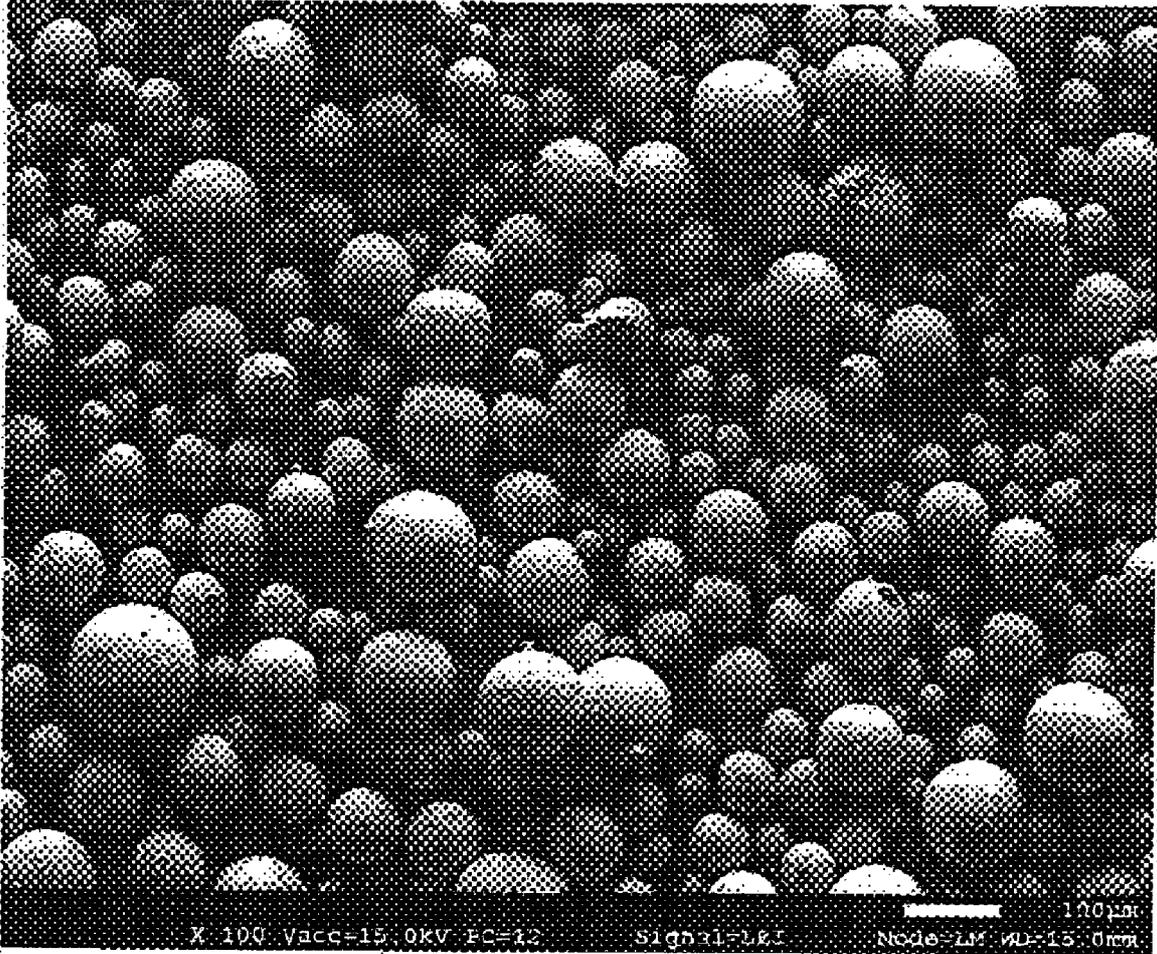
Фиг. 5

Где сверху вниз:

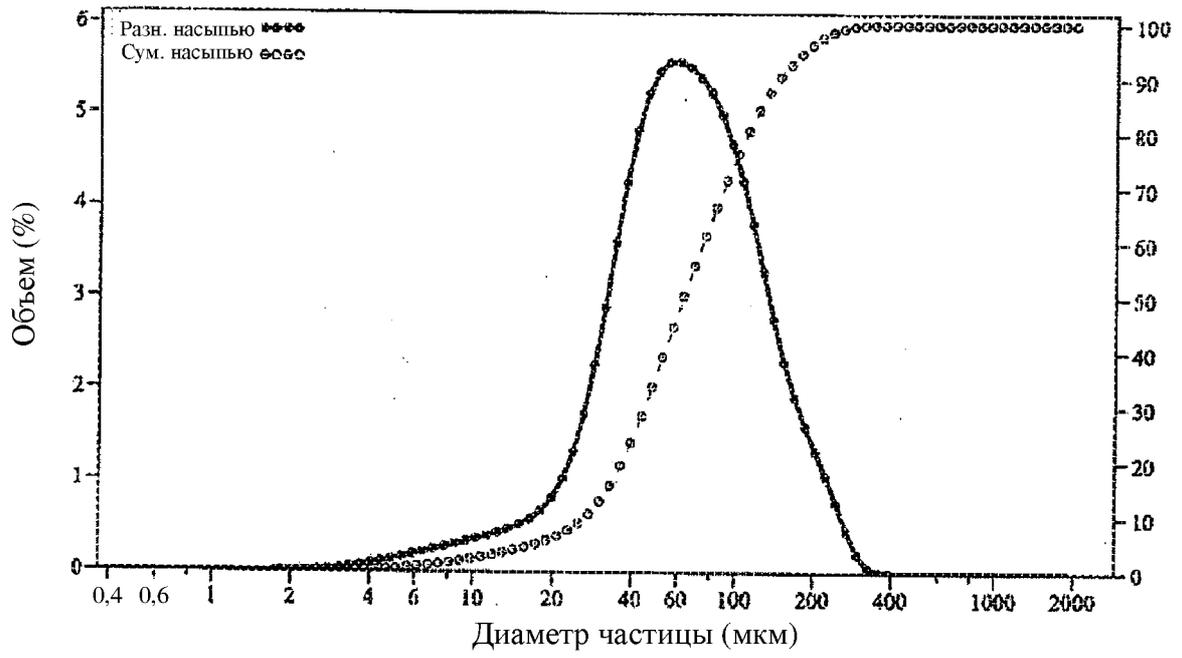
1. Уставка по скорости подачи
2. Уставка по току на источнике питания с управлением током
3. Обратная связь по току на источнике питания с управлением током
4. Обратная связь по напряжению на источнике питания с управлением током
5. Уставка по напряжению для источника питания с управлением напряжением
6. Обратная связь по току для источника питания с управлением напряжением
7. Обратная связь по напряжению для источника питания с управлением напряжением



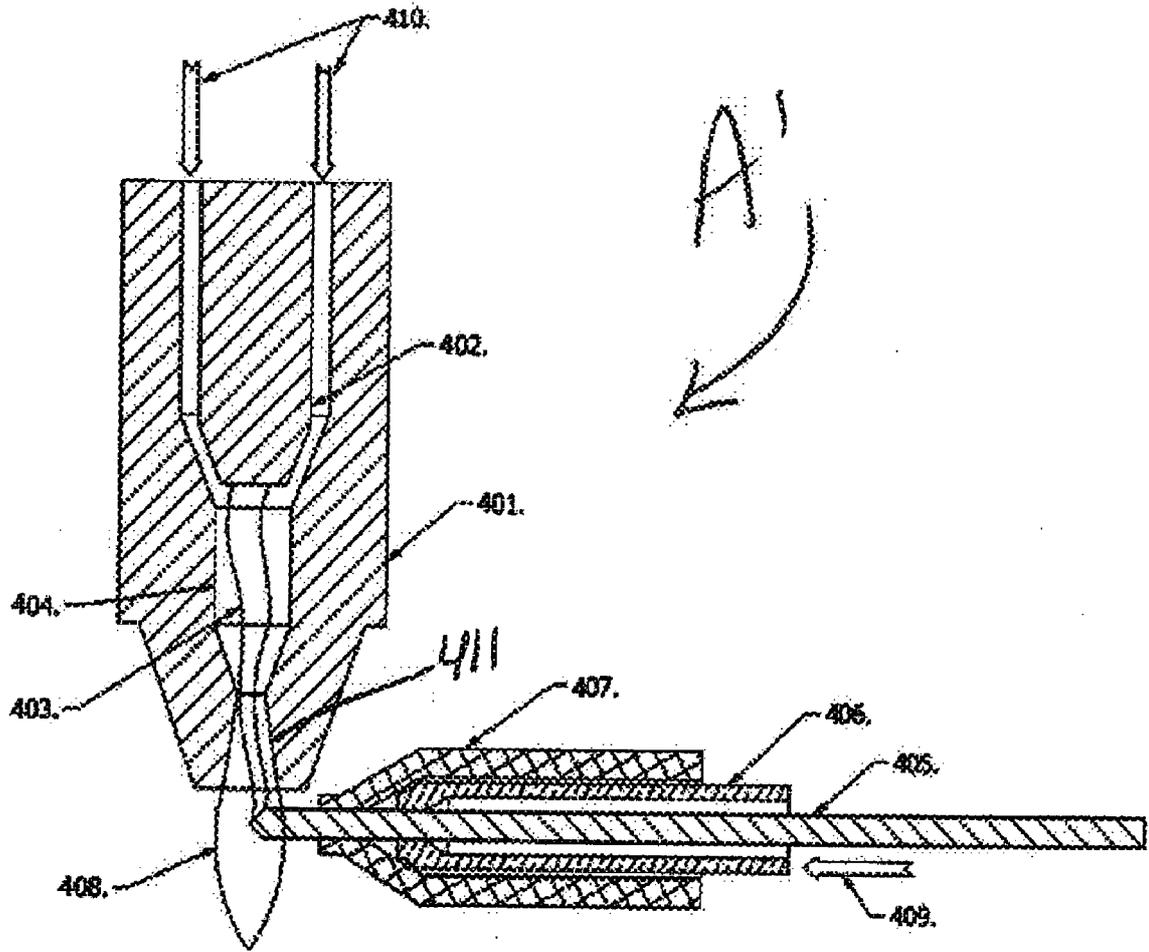
Фиг. 6 - Ti-6Al-4V Марка 23



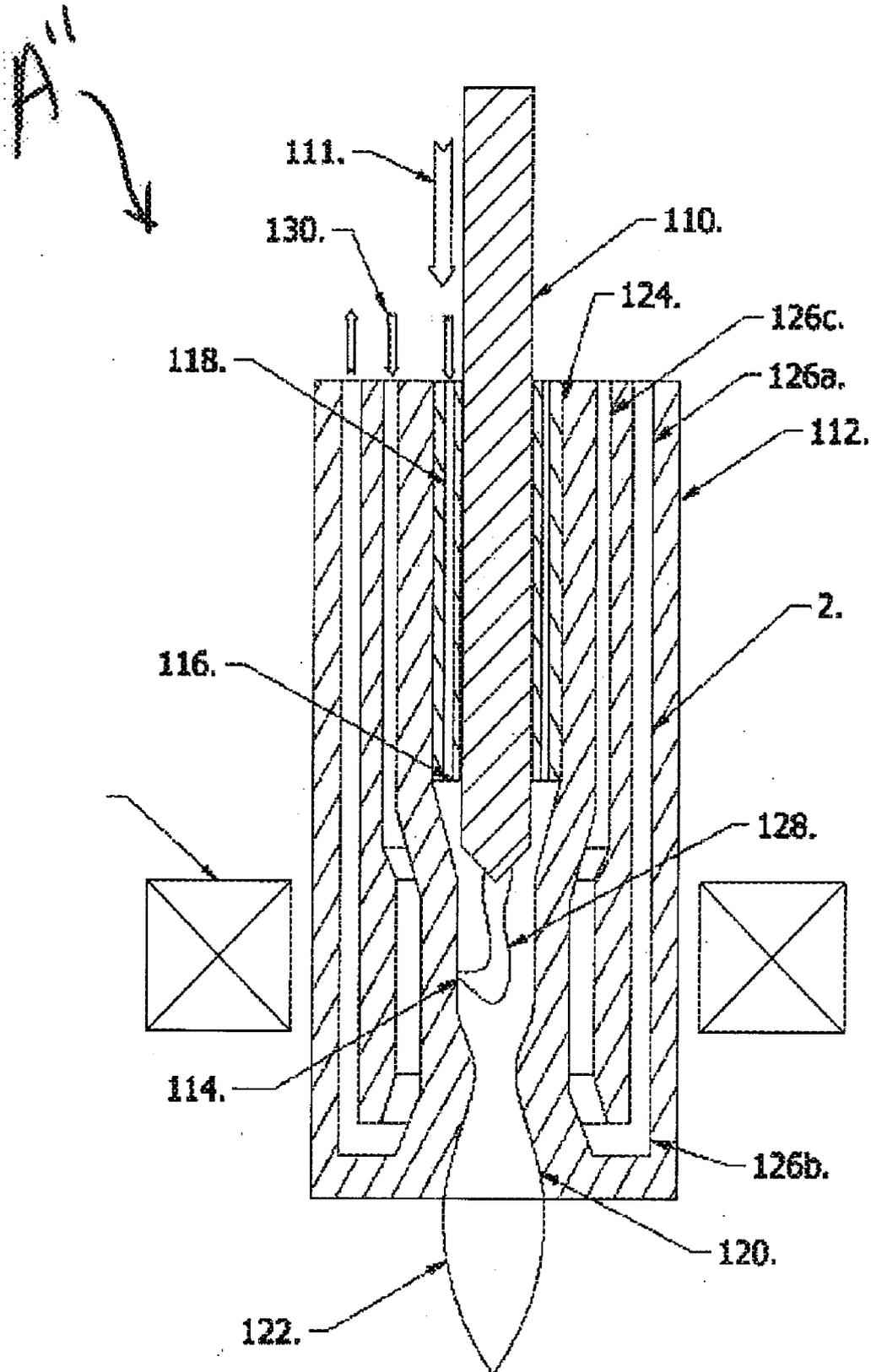
Фиг. 7 - Цирконий



Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10