

## Аппаратурное оформление процесса получения алюминиевых порошков

© Н. В. Немчинова, К. О. Тузов

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

**Аннотация.** Алюминиевые порошки и пудры находят широкое применение в различных отраслях. Основным сырьем служит первичный алюминий, получаемый электролизом криолит-глиноземных расплавов. Для производства алюминиевых порошков используют физико-механический способ. Он основан на распылении расплавленного предварительно измельченного металла сжатым газом (в частности, азотом). Для расплавления алюминия применяют однокамерную электрическую отражательную печь емкостью 5 т и мощностью 150 кВт с возможностью достижения температуры 900°C. Для нагрева газа – азота – используют электрическую однокамерную шахтную печь мощностью 150 кВт (со стальным змеевиком), позволяющую нагреть азот в количестве не менее 750 м<sup>3</sup>/ч до температуры не менее 700°C. Наибольшая эффективность распыления происходит, когда нагретый до оптимальной температуры расплав (900°C) распыляется азотом, нагретым до температуры плавления распыляемого металла (660±10°C). Пылесосажающая установка для производства и разделения алюминиевых порошков на фракции состоит из пылесосажаателя для сбора и охлаждения полученного алюминиевого порошка; грохота для разделения порошка на фракции и его выгрузки; циклона для «грубой» очистки пылегазовой смеси и рукавных фильтров, предназначенных для «тонкой» очистки пылегазовой смеси. Средний размер частиц алюминиевого порошка измеряется на приборе «ANALYSETTE 22 MicroTec plus» (Fritsch, Германия).

**Ключевые слова:** алюминиевые порошки, плавильная печь сопротивления, пылесосажающая установка, форсунка

## Hardware design of the process of obtaining aluminum powders

© Nina V. Nemchinova, Konstantin O. Tuzov

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation*

**Abstract.** Aluminum powders and powders are widely used in various industries. The main raw material is primary aluminum obtained by electrolysis of cryolite-alumina melts. For the production of aluminum powders, a physical and mechanical method is used. It is based on spraying molten pre-crushed metal with compressed gas (in particular, nitrogen). To melt aluminum, a single-chamber electric reflective furnace with a capacity of 5 tons and a power of 150 kW is used with the ability to reach a temperature of 900°C. To heat the gas - nitrogen - an electric single-chamber shaft furnace with a capacity of 150 kW (with a steel coil) is used, which allows heating nitrogen in an amount of at least 750 m<sup>3</sup>/h to a temperature of at least 700°C. The highest sputtering efficiency occurs when the melt heated to the optimum temperature (900°C) is sprayed with nitrogen heated to the melting temperature of the sprayed metal (660±10°C). The pulverizing plant for the production and separation of aluminum powders into fractions consists of a dust collector for collecting and cooling the obtained aluminum powder; a screen for separating powder into fractions and unloading it; cyclone for "coarse" cleaning of dust and gas mixture and bag filters designed for "fine" cleaning of dust and gas mixture. The average particle size of the aluminum powder is measured on an ANALYSETTE 22 MicroTec plus device (Fritsch, Germany).

**Keywords:** aluminum powders, resistance melting furnace, pulverization unit, nozzle

### Введение

Алюминий нашел широкое применение в различных областях благодаря своим уникальным свойствам: легкости, значительной электропроводностью, высокой стойкостью к коррозии. Первичный алюминий в промышленных объемах получают электролитическим способом в электролизерах с предварительно обожженными анодами или с анодом Содерберга [1–3]. Кроме алюминийсодержащих сплавов, алюминий в виде порошков и пудр также широко используется в различных

областях благодаря физико-химическим свойствам: высокой реакционной способности, большой энергией сгорания, высокой скорости горения, коррозионной стойкости в атмосфере и т. д. [4].

Так, порошкообразный алюминий используют как высокотеплотворный компонент ракетных топлив, а также для приготовления пиротехнических смесей. Также алюминиевую пудру используют в качестве красочного и защитного пигмента в составе различных красок, лаков и эмалей. Широко используют

алюминиевые порошки и гранулы в качестве раскислителя чугуна, при литье черных металлов, для алюминотермических процессов восстановления ряда оксидов тугоплавких металлов. Применяют алюминиевые порошки для получения водорода, алюминийорганических соединений, при полимеризации этилов. Высокочистые алюминиевые порошки используют при производстве оксиднопроводниковых конденсаторов. Широко применяют алюминиевые пудры и пасты в качестве газообразователя при производстве ячеистых бетонов [4–11].

Для получения алюминиевых порошков используют различные способы<sup>1</sup>.

*Физико-механические способы*, в процессе осуществления которых не происходит принципиальных изменений химического состава исходного материала. Схема получения порошков данными способами включает в себя:

1) механическое измельчение (дробление, размол хрупких сплавов, фрезерование и другие виды механической обработки металлов резанием);

2) распыление расплавленного металла сжатым газом или жидкостью, разбрызгиванием струи расплава центробежными силами (с помощью вращающегося перфорированного стакана, диска, конуса и т. п., метод вращающихся электродов и др.);

3) конденсацию металла из первой фазы (независимо от метода перевода металла в парообразное состояние – электрической дугой, плазменным испарением, испарением в глубоком вакууме и др.).

*Физико-химические способы*, сопровождающиеся принципиальными изменениями химического состава исходного материала в процессе его измельчения. Процесс получения алюминиевых порошков при этом состоит из:

1) электрического осаждения алюминия из растворов и расплавов;

2) восстановления или термического разложения алюминиевых соединений в газовой фазе или в растворе;

3) термического восстановления соеди-

нений алюминия в твердой фазе.

Физико-механические способы измельчения являются основными в производстве алюминиевой порошковой продукции. Наибольшее распространение в промышленности получил способ распыления расплавленного металла сжатым газом.

Пulверизация (распыление) – этот метод характеризуется сравнительно простой аппаратурно-технологической схемой производства порошков, высокой производительностью процесса, возможностью получения порошков в широком интервале дисперсности - от единиц мкм до 1–2 мм с формой частиц от сферической до каплевидной или неправильной. Процесс распыления расплавленного металла заключается в механическом разрушении струи жидкого металла упругой струей газа или жидкости, обладающей большой кинетической энергией [4, 12].

Далее проводят рассев – разделение полидисперсных порошков на отдельные фракции просеиванием через сита (ситовой рассев). При расसेве порошков из алюминия и его сплавов используют тканые сита из латуни и фосфористой бронзы, нержавеющей стали с квадратными отверстиями. Для осуществления ситового рассева используют грохоты. По характеру сеющей поверхности их разделяют на плоские и барабанные, а в зависимости от положения сит – на колонные и горизонтальные. Плоские грохота подразделяют на две основные группы: качающие и вибрационные.

### **Аппаратурное оформление процесса получения алюминиевых порошков**

Для получения алюминиевых порошков в ООО «СУАП-ПМ» компании РУСАЛ используют физико-механический способ.

#### *Плазменная печь сопротивления*

В данной разновидности электрической печи (рис. 1), применяемой на предприятии, тепло выделяется при прохождении тока через проводник (пластины, спирали и т. д.). В качестве проводника можно использовать нагреватель, передающий тепло нагреваемому металлу (печи сопротивления косвенного действия), или нагреваемый металл (печи сопротивления прямого действия). В печах сопротивления применяются толстые

<sup>1</sup> Либенсон Г. А., Лопатин В. А., Комарницкий Г. В. Процессы порошковой металлургии. В 2 т. М.: МИСИС, 2001. Т. 1. 368 с. 2002. Т. 2. 318 с.

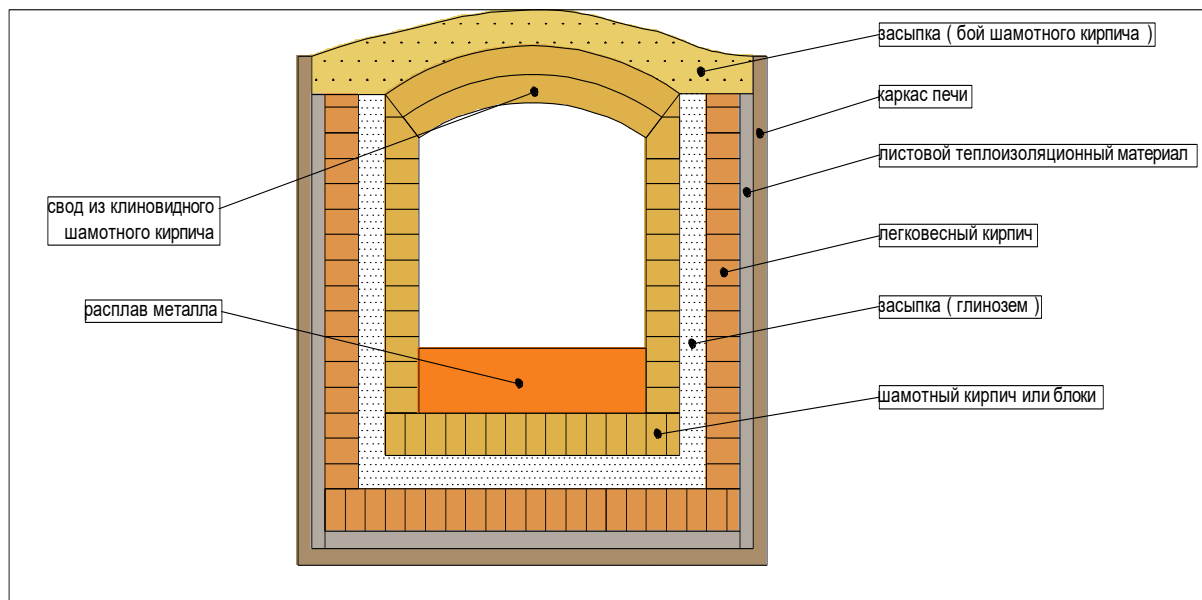


Рис. 1. Плавильная печь сопротивления для расплавления алюминия

нихромовые пластины. И хотя такие пластины часто выходят из строя и требуют замены, себестоимость плавления при помощи такого оборудования является сравнительно низкой.

Характеристики плавильной печи, применяемой на предприятии:

- тип – однокамерная, электрическая, отражательная;
- емкость – 5 т, мощность – 150 кВт,
- температура максимальная – 900°С;
- напряжение на нагревателях – 380 В;
- тип нагревателей – ленточный;
- сечение ленты – 3х30 мм (возможна замена);
- материал нагревателей - сталь Х20Н80 (возможна замена);
- длина одного нагревателя – 17 м;
- количество нагревателей – 18;
- количество зон нагрева – 3;
- количество фаз – 3;
- футеровка – шамот;
- теплоизоляция – диатомит.

#### Устройство нагревателей азота

Нагрев азота производится через нагрев змеевика, который нагревает азот, проходящий через него. Змеевик представляет собой конструкцию из труб, сваренных между собой под углом 90°. Общая длина составляет 140 м, диаметр трубы 50 мм, толщина стенки 4–5 мм. Основным материал змеевика – нержавя-

ющая сталь марки 12Х18Н10Т. Возможен нагрев азота до температуры 700°С, с расходом до 1000 м<sup>3</sup>/ч.

Характеристика печи подогрева азота, применяемой на ООО «СУАЛ-ПМ»:

- электрическая, однокамерная, шахтная, мощность – 150 кВт;
- количество нагреваемого азота – не менее 750 м<sup>3</sup>/ч;
- температура подогрева азота – 700°С;
- змеевик – труба 45х5 мм, длина – 51,8 м, материал – сталь Х18Н9Т, обогрев – электрический;
- количество нагревателей – 24, тип нагревателей – проволочный (спиральный);
- материал нагревателей – сталь Х20Н80;
- диаметр проволоки нагревателей – 7 мм, длина одного нагревателя – 29,5 м;
- напряжение на нагревателях – 380 В;
- максимальная температура – 750°С;
- футеровка – шамот.

#### Устройство pulverизационной установки

Пulверизационные установки предназначены для производства и разделения алюминиевых порошков на фракции, а также для обеспыливания рабочего газа (азота). Наибольшая эффективность распыления происходит, когда нагретый до оптимальной температуры расплав (900°С) распыляется азотом, нагретым до температуры плавления

распыляемого металла ( $660 \pm 10^\circ\text{C}$ ).

Пulверизационная установка состоит из:

- печи для приготовления расплава;
- пылеосадителя для сбора и охлаждения алюминиевого порошка;
- грохота для разделения порошка на фракции и выгрузки его в тару;
- циклона для грубой очистки пылегазовой смеси;
- рукавных фильтров, предназначенных для тонкой очистки пылегазовой смеси.

Пылеосадитель представляет собой цилиндр из нержавеющей стали с раструбом и форсуночной плитой (для установки форсунки). Порошок, получаемый в процессе распыления, осаждается в нижней конической части пылеосадителя и выгружается в грохот. С внешней стороны пылеосадителя наварена рубашка водяного охлаждения, которая охлаждает пылеосадитель и порошок в нем. В случае отклонения от нормальной работы форсуночного узла или работы рубашки водяного охлаждения происходит образование коры на стенках пылеосадителя, что является грубейшим нарушением.

Грохот установлен под пылеосадителем и соединен с ним мягким рукавом. Представляет собой металлический короб с полками для установки сит. Крепится к опорам пружинной подвеской. Внутри грохота смонтирован вал с эксцентриками по краям и шкивом

для клиноременной передачи. При вращении вала, смонтированного в корпусе грохота, через клиноременную передачу от электродвигателя под действием центробежных сил, вызванных вращением эксцентриков, расположенных на валу вибратора, корпус грохота получает вибрацию. В результате вибрации грохота частицы pulverизата, находясь в колебательном состоянии в горизонтальном и вертикальном положениях, просеиваются через ячейки сита.

Движущийся по ситам pulverизат делится на две фракции (надситный продукт или отсева – плюсовая фракция, подситный продукт – «деловая» минусовая фракция). Продукты разделения перемещаются вдоль сетки и по днищу грохота и выгружаются через разгрузочные патрубки (горловины) в соединительные рукава, а затем в тару.

Рабочая амплитуда колебаний грохота – 2–6 мм, угол наклона грохота составляет  $7\text{--}12^\circ$ .

Запыленный азот из пылеосадителя по трубопроводу поступает для дальнейшей очистки в циклон (рис. 2), где за счет центробежной силы происходит разделение пыли по размерам частиц. Крупные частицы осаждаются по стенкам вниз и попадают в грохот или кубеля, а очищенный газ поступает для тонкой очистки от пыли в рукавные фильтры.

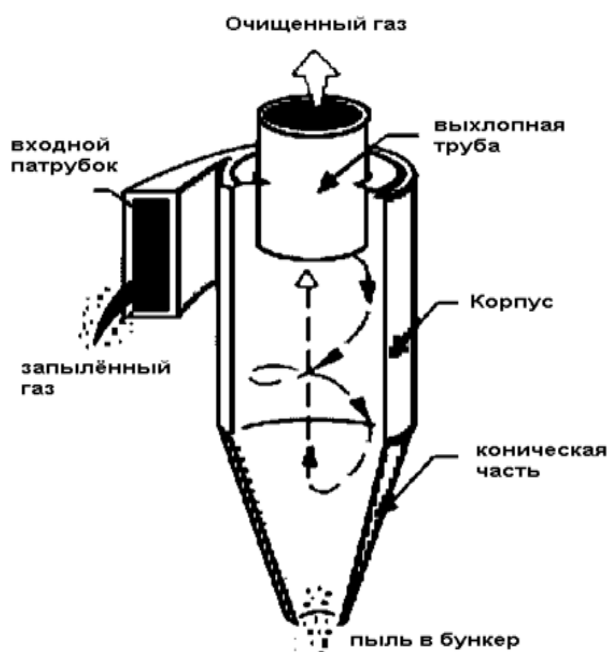


Рис. 2. Циклон пылеуловительной установки

Рукавные фильтры пульверизационной установки состоят из двух фильтров, каждый из которых делится на две секции. Секция представляет собой металлический цилиндр с площадкой внутри корпуса для неподвижного крепления фильтрующих рукавов нижней части корпуса. Азот после циклона поступает в нижнюю коническую часть корпуса секции первого рукавного фильтра, проходит через фильтрующую ткань и выходит в верхней части корпуса. После первого рукавного фильтра азот поступает во второй, и далее процедура повторяется. Осевшая пыль с внутренней поверхности фильтрующей ткани после встряхивания оседает внизу на конусе и выгружается в тару.

Встряхивание и выгрузку порошка запрещается проводить при содержании кислорода более 8 % и давлении более 1,33–2,67 кПа.

На рис. 3 представлена схема работы рукавного фильтра во время пульверизации.

Обеспыленный азот поступает в коллектор и газодувкой, установленной на станции компремирования азота, транспортируется в сухие газгольдеры. Из газгольдеров на всас компрессоров газ направляется для вторичного использования при распылении металла на пульверизационных установках.

*Устройство и работа форсунок для распыления расплавленного алюминия*

Материалом для изготовления корпуса форсунки, крышки, колпачка и подающего азотопровода, является легированная жаропрочная сталь 12X18H10T.

Данная марка стали применяется в кон-

струкциях и деталях, работающих под давлением и в диапазоне температур от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ . Температура начала интенсивного образования окалины в воздушной среде составляет  $850^{\circ}\text{C}$ , поэтому рекомендуемая температура применения в течение длительного времени (до 1000 ч)  $800^{\circ}\text{C}$ .

При нагреве форсунки из стали 12X18H10T выше  $800^{\circ}\text{C}$  рабочие характеристики меняются. Происходят изменения геометрических параметров форсунки (изменение равномерности щелевого зазора, образование окалины на крышке и втулке) и плавятся медные прокладки. Все это приводит к ухудшению качества выпускаемой продукции и выходу из строя форсунок.

Ниппель изготовлен из спрессованной смеси талькохлоритового порошка и жидкого стекла с добавлением графита. Обработанный ниппель не реагирует с расплавом алюминия, протекающим через него, в отличие от железа, которое постепенно наполняется растворенным алюминием.

В качестве металлопровода (колена) используют трубы из чугуна марки СЧ 20, с углом поворота  $120^{\circ}$  относительно оси корпуса форсунки. Прокладки между крышкой и корпусом форсунки, а также между втулкой и корпусом форсунки – медные. Прокладки между коленом и колпачком паранитовые, феранитовые или асбестовые.

Прокладки предназначены для создания герметичности и предотвращения приваривания металлических частей форсунки между собой.

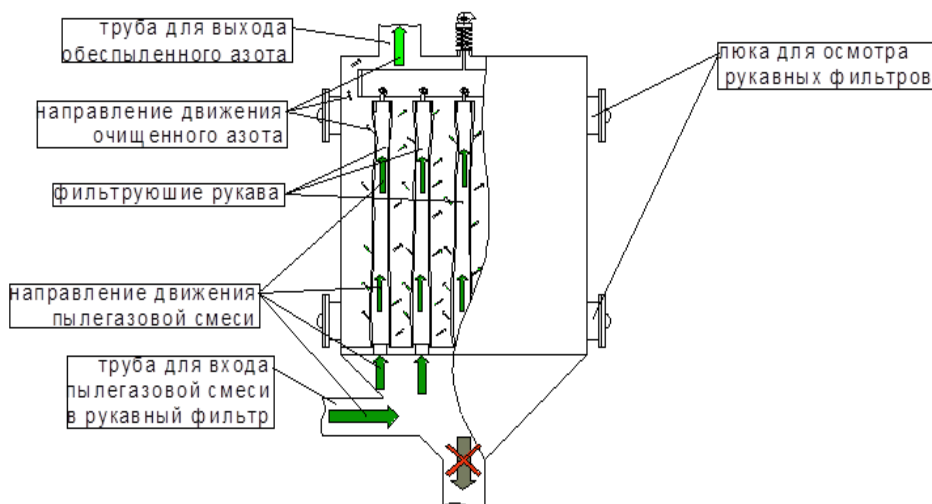


Рис. 3. Схема работы рукавного фильтра во время пульверизации

На рис. 4 представлена эжекционная форсунка.

В корпус форсунки с наружной стороны вкручена крышка, а с внутренней вставляется втулка с ниппелем. Также с внутренней стороны в корпус форсунки устанавливаются четыре шпильки, на которые одевается прижимная плашка. В прижимную плашку заранее вставлен металлопровод (колени). Вся конструкция закрепляется четырьмя гайками, завинченными на шпильках. При сборке форсунки необходимо следить, чтобы втулка (носик) была под обрез с крышкой, это достигается подбором втулки и установкой медных прокладок между втулкой и корпусом форсунки.

Регулировка равномерности кольцевого зазора между втулкой и крышкой осуществляется попеременным закручиванием или раскручиванием противоположных гаек. После регулировки гайки должны быть затянуты, иначе при нагреве произойдет смещение втулки, и, как следствие, нарушение всех геометрических размеров сборки форсунки. После сборки форсунки и регулировки кольцевого зазора производится регулировка диаметра внутреннего отверстия ниппеля.

1 – корпус, 2 – крышка с медной прокладкой, 3 – втулка с медной прокладкой, 4 – ниппель с расширяющимся соплом, 5 – металлопровод (колени), 6 – прижимная плашка, 7 – резьбовое соединение (четырёх шпилек и четырёх гаек).

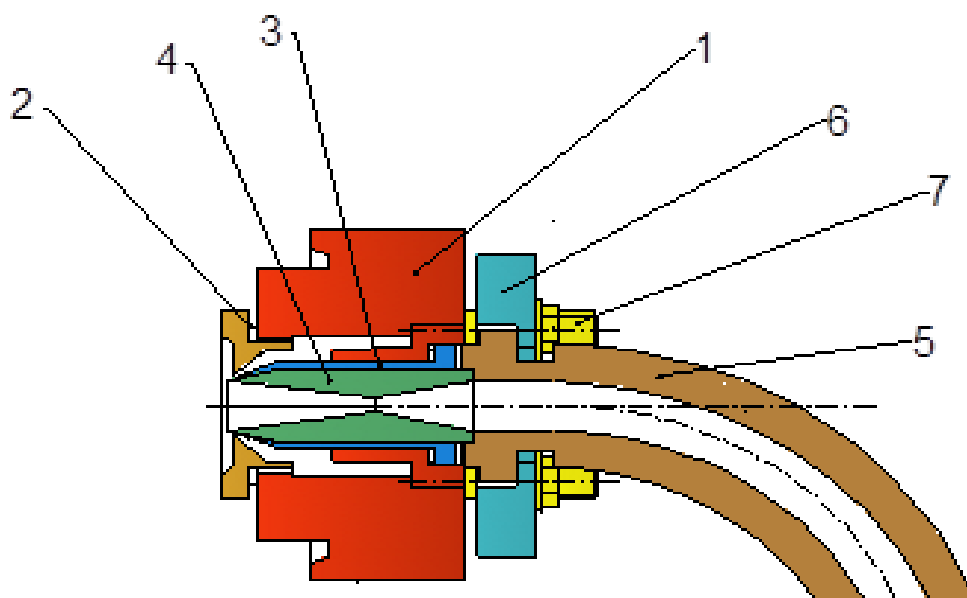


Рис. 4. Эжекционная форсунка

Выполнив сверловку, производится регулировка размера выступающей части носика ниппеля над крышкой. Регулировка высоты носика ниппеля выполняется посредством специальных колец (отличных по высоте, т. е. 1 мм, 1,5 мм, 2 мм и т. д.) и наждачной бумаги.

Уменьшение и увеличение выступающей части носика ниппеля влияет на производительность форсунки и форму факела распыляемых частиц.

Азот, проходящий через кольцевой зазор, между втулкой и крышкой образует газовый конус, во внутренней полости которого возникает вакуум. Под действием образовавшейся разности давления расплавленный металл засасывается по колени и вытекает через ниппель во внутреннюю полость газового конуса, где начинается его разрушение и образование порошка.

Под действием сил поверхностного натяжения, возмущений, создаваемых трением на границе «жидкость – газ» и разности скорости движения жидкости и газа, струя металла в ниппеле разрушается на отдельные капли.

#### Упаковка алюминиевых порошков в тару

После разделения полученные фракции алюминиевого порошка загружаются в тару. Общий вид алюминиевого порошка представлен на рис. 5.





Рис. 5. Общий вид алюминиевого порошка (пудры) с средним размером частиц по гранулометрическому составу 17 мкм

Качество произведенного пудры (порошка) измеряется на приборе «ANALYSETTE 22 MicroTec plus» (Fritsch, Германия), где определяется средний размер частиц алюминиевого порошка.

### Заключение

Алюминиевые порошки находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Пудры и порошки на основе алю-

миния производят в ООО «СУАЛ-ПМ» физико-механическим способом – путем распыления расплавленного металла сжатым газом. Данный способ включает в себя несколько стадий. Это – механическое измельчение, распыление расплавленного металла сжатым азотом, конденсацию металла. Основное оборудование, используемое для получения порошков, это отражательная однокамерная печь сопротивления для расплавления алюминия (емкостью 5 т и мощностью 150 кВт). Для подогрева азота используется электрическая однокамерная шахтная печь, позволяющая нагреть газ в количестве 750 м<sup>3</sup>/ч до максимальной температуры 700°C (со стальным змеевиком). Пудры (порошки) установка для производства и разделения алюминиевых порошков на фракции состоит из пылесадителя для сбора и охлаждения алюминиевого порошка, расплавленного в отражательной печи; грохота для разделения порошка на фракции и его выгрузки; циклона для «грубой» очистки пылегазовой смеси и рукавных фильтров, предназначенных для «тонкой» очистки пылегазовой смеси.

### Список источников

1. Gjotheim K., Kvande H. *Introduction to aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
2. Prasad S. Studies on the Hall-Heroult Aluminum Electrowinning Process // *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2000. Vol. 11. No. 3. P. 245–251. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532000000300008>
3. Тютрин А. А., Немчинова Н. В., Володькина А. А. Изучение влияния параметров процесса электролиза на основные технико-экономические показатели работы ванн ОА-300М // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 4. С. 906–918.
4. Гопаенко В. Г., Осипов Б. Р., Назаров Б. П., Рюмин В. М., Волков И. В., Ясаков Н. И. Производство и применение алюминиевых порошков и пудр. М.: Metallurgy, 1980. 68 с.
5. Кем А. Ю. Специальные методы порошковой металлургии для изделий электронной техники. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. 153 с.
6. Uzum A., Ashikaga T., Noguchi T., Kanda H., Matsuoka T., Nakanishi T., et al. Water Soluble Aluminum Paste Using Polyvinyl Alcohol for Silicon Solar Cells // *International Journal of Photoenergy*, 2015.
7. Lee H.M., Kim Y.J. Preparation of size-controlled fine Al particles for application to rear electrode of Si solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. Vol. 95. No. 12. P. 3352–3358.
8. Ничипоренко Д. С., Найда Ю. И., Медведовский А. Б. Распыленные металлические порошки. Киев: Наукова думка, 1980. 240 с.
9. Aoyama T., Aoki M., Sumita I., Ogura A. Effects of particle size of aluminum powder in silver/aluminum paste on n-type solar cells // *AIMS Materials Science*. 2018. Vol. 5. Iss. 4. P. 614–623.
10. Жилина Е. М., Красиков С. А., Агафонов С. Н., Ведмидь Л. Б., Жидовинова С. В. Термодинамические и кинетические особенности совместного алюминотермического восстановления титана и циркония из оксидов // *Бутлеровские сообщения*. 2016. Т. 45. № 1. С. 130–135.
11. Антипина С. А. Змановский С. В. Исследование влияния порошкового и гранулированного алюминиевого газообразователя на свойства ячеистого бетона // *Строительные материалы*. 2016. № 4. С. 88–91.
12. Пат. № 2204462 С1, Российская Федерация, В22F 9/06, 9/04. Способ получения алюминиевых порошков и пудр / А. И. Галанов, В. Г. Гопаенко, И. В. Волков, В. П. Черепанов, С. Ю. Петрович, В. Н. Стецкий; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа «Всероссийский алюминиево-магний институт». Заявл. 23.08.2001; опубл. 20.05.2003. Бюл. №14.

**Информация об авторах / Information about the Authors**

**Нина Владимировна Немчинова,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующая кафедрой металлургии цветных  
металлов,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская  
Федерация,  
ninavn@yandex.ru

**Nina V. Nemchinova,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Non-Ferrous Metals  
Metallurgy,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation,  
ninavn@yandex.ru

**Константин Олегович Тузов,**  
магистрант,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская  
Федерация,  
dtabakov@mail.ru

**Konstantin O. Tuzov,**  
Undergraduate,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation,  
tuzov\_kostya@mail.ru