

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.09

УДК 621.74:666.85/89

М.В. Юдин¹, М.М. Николаев¹, А.М. Игнатова², М.Н. Игнатов²¹ ПАО «Корпорация «ВСМПО-Ависма»», Березники, Россия² Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА ФТОРФЛОГОПИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Быстрый износ футеровки является актуальной проблемой при электролизном способе получения магния. Повышение срока службы футеровки в 3–4 раза и, как следствие, повышение конкурентоспособности производства первичного магния обеспечивается модернизацией магниевых электролизеров путем замены стандартной футеровки на литые изделия из слюдокристаллического материала – фторфлогопита. Цель работы определена как подробное рассмотрение функциональной и технологической схемы и процесса получения изделий из фторфлогопита. Калиевый фторфлогопит ($KMg_3[Si_5AlO_{10}]F_2$) имеет стеклокристаллическое строение, доля стеклообразной фазы составляет 5–8 %, кристаллическая часть представлена агрегатами пластинчатой формы протяженностью до 5 мм и толщиной до 0,1 мм.

На основе литературных источников и практического опыта предложена наиболее оптимальная функциональная и технологическая схема производства фторфлогопитовых изделий.

По своей сути технология производства камнелитых фторфлогопитовых изделий представляет симбиоз технологий рудотермической обработки минерального сырья и литейного производства. Близость к рудотермической технологии выражается в обработке шихты для получения силикатного расплава электротермическим способом, подходы литейного производства использованы непосредственно для разработки технологии получения фторфлогопитовых отливок.

Разработанная технология включает следующие основные переделы: подготовка сырьевых материалов и приготовление шихты; плавление шихты и приготовление фторфлогопитового расплава; изготовление, подготовка и сборка литейных форм; выпуск расплава из печи в ковш и заливка литейных форм; затвердевание отливок и извлечение их из форм; термическая обработка отливок; очистка, обработка отливок и контроль их качества; очистка отходящих газов; складирование готовой продукции. Технологический процесс может быть при необходимости адаптирован с учетом обширной сырьевой базы Пермского края и организации «гибких» технологий.

Ключевые слова: фторфлогопит, слюдокристаллический материал, электролизное получение магния, футеровка, каменное литье, петрургия, организация производства, безотходное производство, фтористый водород, кремнефтористые соли, рециклинг.

M.V. Yudin¹, M.M. Nikolaev¹, A.M. Ignatova², M.N. Ignatov²

¹ Public Stock Company “VSMPO-Avisma Corporation”,
Berezniki, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

FUNCTIONAL AND TECHNOLOGICAL SCHEME OF PRODUCTION OF MANUFACTURING FLUOROPHLOGOPITE

Rapid wear of the lining is an urgent problem in the electrolytic process for producing magnesium. Increased liner life by 3-4 times, and as a consequence increase the competitiveness of primary magnesium production ensured the modernization of magnesium electrolytic cells by replacing the standard lining on castings from mica crystalline material – fluorophlogopite. The aim of the work is defined as a detailed presentation of the functional and technological scheme and the process of obtaining products from fluorophlogopite. Potassium fluorophlogopite ($KMg_3[Si_3AlO_{10}]F_2$) has a glass-ceramic structure, the proportion of the glassy phase is 5-8%, the crystalline part is plate-aggregates to 5 mm length and 0.1 mm in thickness.

Based on the literature and practical experience to offer the most optimal functional and technological scheme of production fluorophlogopite products.

At its core production fluorophlogopite product technology represents a symbiosis of technology ore-thermal processing of mineral raw materials and foundry. The proximity to the ore-thermal technology is reflected in the processing charge for silicate melt electro thermal process foundry approaches used directly for the development of technology for fluorophlogopite castings.

The developed technology includes the following main stages: preparation of raw materials and the preparation of the charge; melting of the charge and the preparation fluorophlogopite melt; production, preparation and assembly of the molds; melt discharging from the furnace into a ladle and casting molds; solidification of castings and removing them from the molds; heat treatment of castings; cleaning, casting processing and quality control; cleaning of exhaust gases; storage of finished products. The technological process can be adapted if necessary in view of the vast resource base of the Perm Region and in terms of the organization of “flexible” technologies.

Keywords: fluorophlogopite, mica crystalline material, electrolytic magnesium production, lining, stone molding, petroliа, production organization, non-waste production, hydrogen fluoride, fluorosilicate salt, recycling.

Магний и сплавы на его основе широко востребованы в авиационно-космической индустрии. В промышленных объемах магний получают преимущественно методом электролиза. При всем совершенстве конструкции современных электролизеров быстрый износ футеровки остается актуальной проблемой при их эксплуатации. В связи с этим одной из возможностей повышения конкурентоспособности производства первичного магния является модернизация магниевых электролизеров путем замены стандартной футеровки на литые изделия из слюдокристаллического материала – фторфлогопита, что увеличивает срок службы электролизера в 3–4 раза [1].

В настоящее время в РФ нет предприятий, выпускающих литые изделия из фторфлогопита в промышленных объемах, а поставки тако-

вых изделий из стран СНГ и дальнего зарубежья не способствуют повышению конкурентоспособности производства первичного магния в России. В связи с этим цель настоящей работы является актуальной и определена как подробное рассмотрение функциональной и технологической схемы и процесса получения изделий из фторфлогопита.

Калиевый фторфлогопит ($\text{KMg}_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]\text{F}_2$) имеет стеклокристаллическое строение, доля стеклообразной фазы составляет 5–8 %, кристаллическая часть представлена агрегатами пластинчатой формы протяженностью до 5 мм и толщиной до 0,1 мм. Структура фторфлогопита формируется при затвердевании расплава на основе сырьевой композиции из кварцевого песка, глинозема, периклаза и кремнефтористого калия [2–4].

На основе анализа научно-технической информации зарубежных и российских источников и практического опыта производства фторфлогопита в Казахстане [5–8] составлена, на наш взгляд, наиболее оптимальная функциональная и технологическая схема производства фторфлогопитовых изделий (рис. 1).

Технология производства камнелитых фторфлогопитовых изделий – это симбиоз технологий рудотермической обработки минерального сырья и литейного производства. Близость к рудотермической технологии выражается в обработке шихты для получения силикатного расплава электротермическим способом, подходы литейного производства использованы непосредственно для разработки технологии получения фторфлогопитовых отливок.

На рис. 2 представлено проектное решение реализации разработанной технологии. Технология включает следующие основные переделы:

- подготовка сырьевых материалов и приготовление шихты;
- плавление шихты и приготовление фторфлогопитового расплава;
- изготовление, подготовка и сборка литейных форм;
- выпуск расплава из печи в ковш и заливка литейных форм;
- затвердевание отливок и извлечение их из форм;
- термическая обработка отливок;
- очистка, обработка отливок и контроль их качества;
- очистка отходящих газов;
- складирование готовой продукции.

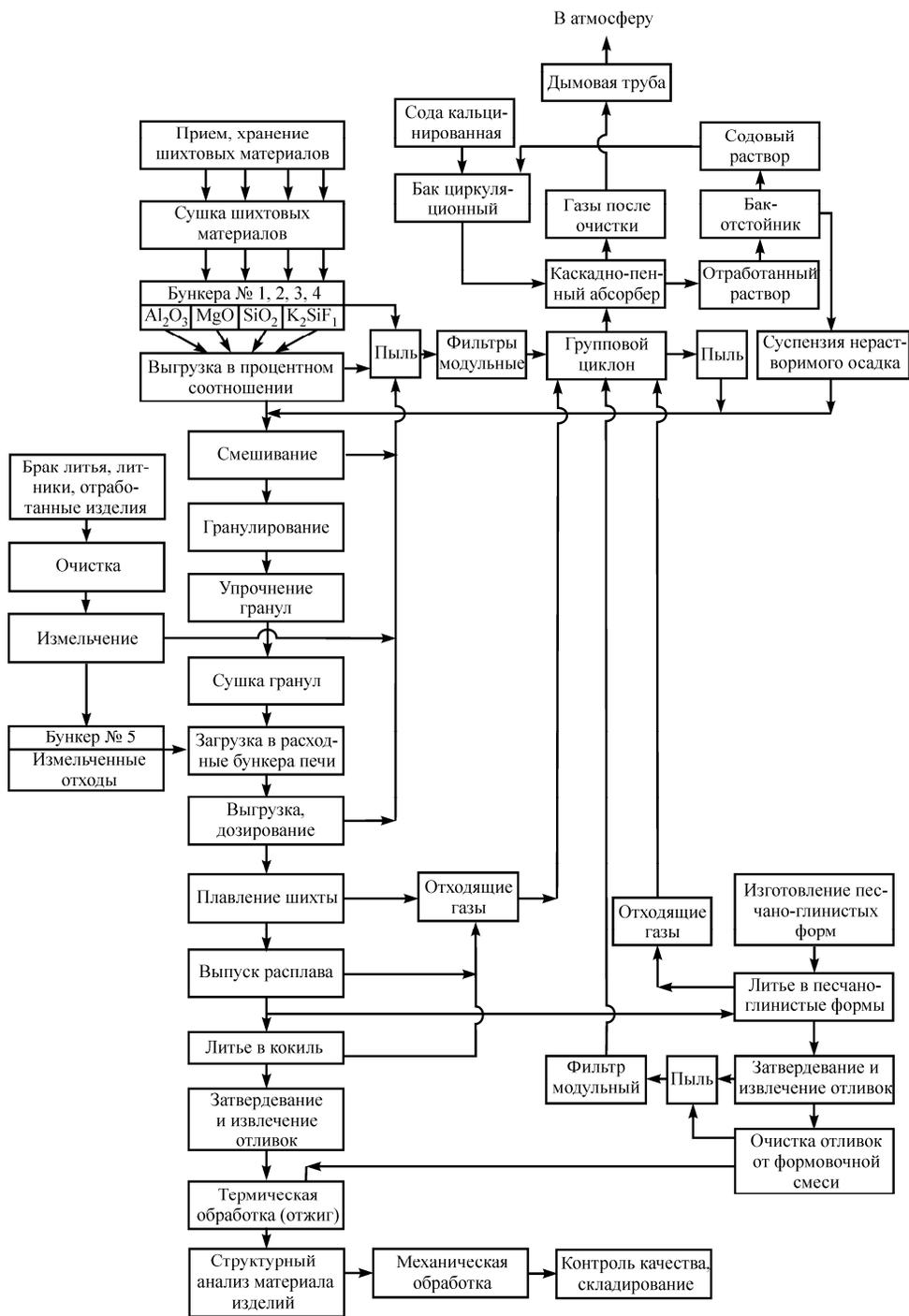


Рис. 1. Принципиальная схема технологического процесса получения камнелитых фторфлогопитовых изделий

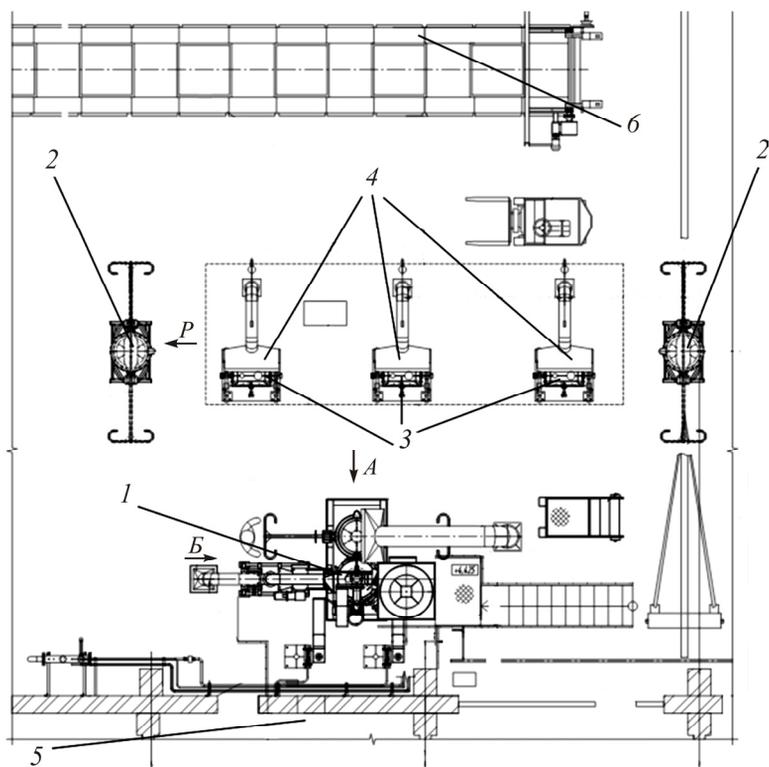


Рис. 2. Проектная схема организации участка по изготовлению отливок из фторфлогопита: 1 – электродуговая печь; 2 – чайниковый ковш; 3 – литейные формы; 4 – локальная вытяжка; 5 – трансформаторный отсек; 6 – термическая печь для отжига отливок

Подготовка сырьевых материалов и приготовление шихты. Подготовленные сырьевые материалы (кварцевый песок, глинозем, периклаз и калий кремнефтористый), взвешенные в заданных соотношениях, смешивают, брикетируют (компактируют) и сушат. Влажность сырьевой композиции при смешивании и брикетировании должна быть в пределах 3–8 %. Сушку брикетированного сырья производят в конвейерной проходной и шахтной печах при температуре $(250 \pm 50) ^\circ\text{C}$.

Приготовление шихты осуществляют с помощью дозирочно-смесительного комплекса, состоящего из системы бункеров с дозаторами, весоизмерительного устройства (например, весовая бадья), герметичного транспортирующего шнекового конвейера и смесителя барабанного типа. В качестве смесителя может быть использовано стан-

дартное оборудование: бетоносмеситель, барабанный смеситель или смешивающие бегуны.

Смеситель необходимо герметизировать, а внутреннюю полость бетономешалки и барабанного смесителя покрыть резиной, чтобы обеспечить длительный срок службы и исключить загрязнение шихты железом.

В тех случаях, когда сырьевые материалы поступают на производство в неподготовленном к использованию виде (некондиционное сырье), должна проводиться их сушка при температуре до 200–300 °С, измельчение в валковой, щековой или конусной дробилке и просев на вибросите.

Важной особенностью фторфлогопитовых изделий является непроницаемость к материалам, с которыми они контактируют в процессе эксплуатации. Это позволяет использовать отработанные изделия после поверхностной очистки в качестве вторичного сырья. Кроме того, в качестве вторичного сырья могут использоваться отходы собственного производства (скрап, литники и т.п.) и бракованные изделия.

После измельчения вторичное сырье подвергается тем же процедурам обработки, что и первичное, совместно с ним, что способствует усреднению состава шихты.

Плавление шихты и приготовление фторфлогопитового расплава осуществляют в дуговой электропечи (см. рис. 2, поз. 1) в температурном интервале 1380–1720 °С. Готовый фторфлогопитовый расплав выпускают в ковши (см. рис. 2, поз. 2) и направляют на заливочный плац, где проводится заполнение литейных форм (см. рис. 2, поз. 3). Детали простой конфигурации в виде плит и блоков отливают в постоянных (металлических и/или графитовых) формах, а сложные фасонные изделия получают в песчано-глинистых или комбинированных литейных формах.

Расплав фторфлогопита относится к силикатным расплавам, для их плавления, как известно, широко используются трехфазные дуговые печи, например в производстве базальтового каменного литья. Однако трехфазные дуговые печи традиционной конструкции не подходит для получения фторфлогопита, для его получения предпочтительно использовать в качестве плавильного агрегата однофазную дуговую печь [9, 10].

Однофазная дуговая электропечь для получения расплава фторфлогопита представляет собой вертикально расположенный водоохлаждаемый кокиль, вращающийся в горизонтальной оси, для слива расплава. Нижняя полость кокиля закрыта графитированным электродом диаметром 400 мм, а верхняя – металлической крышкой с боковым патрубком для отсоса газов, выделяемых в процессе плавки. Сверху через отверстие в крышке вводится верхний подвижный электрод. Оба электрода изолированы от массы печи. Печь работает на гарнисаже, это значит, что конструкция печи не предусматривает футеровки, а за счет интенсивного водяного охлаждения на стенках печи образуется корка застывшего расплава, которая не только выполняет функцию футеровки, но и является диэлектриком. После плавки корка может быть легко удалена. Для крупных объемов расплава печь может быть дополнена внутри графитовой футеровкой толщиной 65 мм.

В качестве источника питания для таких агрегатов используют сварочные трансформаторы ТШС-3000-1, как правило два, включаемые параллельно и последовательно. Электрическое оборудование для питания печи, как правило, располагают в специализированном помещении (см. рис. 2, поз. 5).

По конструктивному исполнению плавильная печь должна быть закрытая, с круглой ванной, с графитированными электродами и футеровкой, поворотной, обеспечивать слив расплава через сливной желоб, расположенный в верхней части ванны печи. Глубина ванны печи должна быть больше ее диаметра, чтобы уменьшить поверхность испарения расплава. В своде печи должны быть выполнены отверстия для электрода, для трубопроводов шихты и отходов, для патрубка отсоса газов, люков для контроля качества расплава и обслуживания. Кожух печи и свод должны быть с водяным охлаждением.

Рекомендуется в условиях промышленного производства фторфлогопитовых изделий установить в цехе две печи [11, 12]. Использование в отделении камнелитых изделий однофазных электропечей постоянного тока может быть более эффективным, если применять метод плавки с использованием двухканальной силовой установки. Двухканальный источник питания существенно увеличивает общую эффективность процесса плавки и производительность производства. Имея два выхода, источник питания в состоянии обеспечить непрерывное и контролируемое питание двух плавильных печей одновременно. Это

позволяет оператору вести плавку в одной печи и одновременно обес­печивать вторую печь энергией, необходимой для начала плавки и поддержания оптимальной температуры расплава. В случае применения подобной силовой установки общее время, необходимое для осу­ществления полного цикла плавки, уменьшается. Это позволяет увели­чить производительность плавильной установки на 20–40 %.

В условиях современного производства необходимо контролировать работу плавильного агрегата с помощью компьютерной системы. Загрузка шихты и отходов в плавильную печь производится питателем и для точного определения количества загруженного контролируется компьютером. Экран контроля за ходом плавки должен отображать ос­новные параметры на всем протяжении процесса, а также периодически температуру расплава [13].

Плавление шихты в дуговых электропечах является периодиче­ским процессом, включающим основные операции: старт и загрузка шихты, расплавление ее и слив готового расплава в разливочный ковш.

По сравнению с дуговыми печами переменного тока печи постое­нного тока имеют ряд преимуществ, существенных при получении камнелитых фторфлогопитовых изделий:

- графитированный электрод позволяет применять электрический ток более высокой плотности, вследствие чего сокращается время плавки и увеличивается производительность плавильной печи. Это является, пожалуй, основным аспектом при выборе плавильного агрегата, поскольку расплав для получения камнелитых фторфлогопитовых изделий содержит фтористые соединения, поэтому необходимо мак­симально сократить время обработки расплава. В связи с этим и плавку шихты необходимо проводить форсированно, и выпуск расплава из плавильной печи в разливочный ковш необходимо проводить быстро (в течение 3–5 мин), и следует сразу разлить расплав в литейные формы;

- расход графитированных электродов и материалоемкость печи снижаются;

- обеспечивают получение расплавов в широком диапазоне тем­ператур до 1700 °С.

Изготовление, подготовка и сборка литейных форм. Для изго­товления литейных форм используют приемы и методы литейного производства, принятые при получении чугунных и стальных отливок.

Как уже было сказано ранее, в камнелитейном производстве могут быть использованы различные формы. Графитовые литейные формы изготавливают составными из пластин анодного графита марки ПГ размерами, мм: 1100×250×50, 400×250×50, 1100×500×80, 800×500×50.

Для оформления внутренней конфигурации отливок применяют песчано-глинистые стержни.

Песчано-глинистые литейные формы следует применять для получения сложных фасонных изделий с толщиной стенки 15–25 мм. Технология их изготовления не отличается от традиционной литейной технологии. Готовые стержни и формы подсушивают и транспортируют в отделение каменного литья, где производят их сборку и заливку.

При формировании камнелитых отливок в графитовой форме ее внутренняя поверхность нагревается до 900–1100 °С, а наружная – до 800–900 °С, после чего в процессе разборки формы охлаждаются до обычной температуры. В этих условиях графитовые литейные формы имеют ограниченный срок службы. Возможно использование комбинированных литейных форм из чугуна и графита. Поверхность камнелитых отливок, полученных в холодных литейных формах, может иметь послойные наплывы и неслитины. Для устранения этого дефекта литейные формы перед заливкой необходимо подогревать до 150–200 °С.

Выпуск расплава из печи в ковш и заливка литейных форм. Заливку литейных форм фторсиликатным расплавом производят в специальном закрытом боксе, оборудованном вытяжной вентиляцией, обеспечивающей эвакуацию газов, образующихся при заливке. После выпуска плавки из ковша отбирают контрольную пробу и после этого начинают разливку в литейные формы. Выпуск расплава из печи производится в металлические ковши чайникового типа (см. рис. 2, поз. 2), футерованные графитом или набивной массой. Монолитную футеровку разливочных ковшей выполняют набивкой или литьем. Для набивки применяют шамотные, алюмосиликатные и другие массы, содержащие огнеупорную глину и асбестовую крошку. В наливные массы холодного твердения вводят феррохромовый шлак и жидкое стекло. Толщина футеровки около 60–80 мм. К моменту начала разливки наиболее охлаждены в ковше нижние слои расплава. Расплав разливают через носок ковша, перегородка, имеющаяся в ковше, задерживает затвердевшую сверху корочку, а расплав поступает из нижних, более охлажденных слоев. Кожух ковша выполнен сварным [14, 15].

Затвердевание отливок и извлечение их из форм. Камнелитые отливки выдерживают в формах до затвердевания в течение 10–40 мин, (в зависимости от массы и габаритов), затем их извлекают из форм с помощью клещей и подъемно-транспортных механизмов и сразу помещают в термическую печь (см. рис. 2, поз. б) для отжига с начальной температурой в рабочем пространстве печи 900–950 °С. Остатки формовочной массы собирают в короб и отправляют на регенерацию.

Термическая обработка отливок. После извлечения из литейных форм камнелитые горячие отливки помещают в термическую печь и проводят выдержку при температуре 800–900 °С с последующим охлаждением со скоростью 30–80 °С. В качестве термической печи могут быть использованы камерные электропечи с выдвижным подом; применять туннельные печи, как было рекомендовано ранее, нецелесообразно.

Очистка, обработка отливок и контроль их качества. Камнелитые отливки, полученные после отжига, извлекают из печи, очищают от заусенцев, отделяют литники, прибыльные части подвергают очистке, обработке, производят разбраковку, контроль качества и контроль размеров согласно чертежу на изделие, контрольной сборке на стенде для контрольной сборки защитного пояса. Годные изделия собирают в отдельные узлы, подгоняют друг к другу, маркируют и отправляют по назначению. Скрап из ковшей, прибыль, литники и бракованные отливки измельчают и подают в расходный бункер плавильной печи.

Очистка отходящих газов. Технологический процесс производства фторфлогопитовых изделий характеризуется выделениями кремнеземосодержащих, силикатных, магнезитовых пылей, а также токсичных фторсодержащих пылей и газов в рабочую зону производственных помещений. Количество фтористых соединений на 1 т фторфлогопитовых камнелитых изделий составляет в среднем в пересчете на NaF 6,8 кг. В зоне действия плавильной печи и на заливочном плацу в воздухе может присутствовать фтористый водород HF (выше 19,43 °С – бесцветный газ с резким запахом, раздражающим дыхательные пути; ниже этой температуры – бесцветная легкоподвижная жидкость плотностью 0,98 г/см³).

Определены следующие источники выделения пыли и газа:

– Участок подготовки шихты. Пыль сырьевых материалов при разгрузке шихтовых материалов в расходные бункера, дозировании,

смешении шихтовых компонентов, брикетировании шихты, сушке брикетов и дроблении отходов фторфлогопитового литья.

– Печь для приготовления фторфлогопита, разливочный плац. Газы с пылевыми фракциями (фториды, газообразные и взвешенные вещества), вынесенные из плавильной печи при приготовлении фторфлогопитового расплава, а также при выпуске фторфлогопитового расплава в ковш и разливке фторфлогопитового расплава из ковша в кокиля.

– Литейно-формовочный плац. Пыль формовочной и стержневой смесей при изготовлении песчано-глинистых форм. Фторсодержащие газы (фториды газообразные), вынесенные от литейно-формовочного плаца при разливке фторфлогопитового расплава в песчано-глинистые формы.

– Участок изготовления графитовых кокилей и металлических форм. Газы с пылевой фракцией, вынесенные от станков обработки графитовых кокилей и металлических форм (сажа, металлическая пыль). Загрязняющие вещества (оксид железа, марганец и его соединения), выделяющиеся от поста сварки.

– Стенд для контрольной сборки узлов из готовых изделий.

– Лаборатория огнеупоров.

Все участки, которые являются источниками газопылевого загрязнения, оборудованы системами пылегазоулавливания. Каждая линия пылегазоулавливания включает в себя две ступени: первая ступень – сухая пылеочистка (циклоны); вторая ступень – мокрая пылегазоочистка (улавливание фторсодержащих газов и мелкодисперсной пыли).

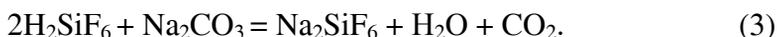
Отходящие газы, содержащие пылевые фракции и газообразные фториды, собираются в общий коллектор и подаются на одну из линий системы очистки. На первой ступени очистки газовый поток проходит через групповой циклон, где происходит его очистка от пылевых фракций и твердых включений. Пыль из бункера циклона периодически направляется в отделение приготовления шихты, где вновь вовлекается в производство.

Очищенные от пыли фторсодержащие газы поступают на вторую ступень очистки в верхнюю часть корпуса каскадно-пенного абсорбера. В качестве абсорбента используется водный раствор кальцинированной соды. Внутри адсорбер разделен вертикальной перегородкой до уровня, находящегося ниже сливного порога. При поступлении газов с одной стороны перегородки уровень жидкости понижается и образу-

ет ступеньку или каскад, вертикальная часть которого служит преградой на пути газового потока. Преодолевая образованную собственным давлением преграду, газы тонко диспергируют часть жидкости, образуя так называемую нестабильную пену. При этом происходит обезвреживание фторсодержащих газов по следующим реакциям:



Нейтрализация образовавшейся кислоты осуществляется карбонатом натрия:



По системе транспортировки суспензия, представляющая собой смесь твердой и жидкой фаз, поступает в бак-отстойник, в котором происходит их гравитационное разделение. Твердый осадок направляется на рециклинг.

Складирование готовой продукции. На складе предусмотрен участок стендов для контрольной сборки защитного пояса электролизера. После термообработки изделия электропогрузчиком перемещаются на участок, где осуществляется срезка прибылей, очистка, механическая обработка, визуальный контроль качества изделий, контрольная сборка защитного пояса электролизера с окончательной механической обработкой изделий. Годные изделия складировются на стеллажах склада готовой продукции. Отходы производства вовлекаются в производственный процесс в качестве вторсырья.

Таким образом, подробно рассмотрена функциональная и технологическая схемы и процессы, обеспечивающие получение изделий из фторфлогопита, с учетом принципов безотходного производства и максимальной защиты рабочего персонала от негативных факторов. Технологический процесс может быть при необходимости адаптирован к обширной сырьевой базе Пермского края с учетом организации «гибких» технологий.

Список литературы

1. Новый принцип компоновки электродов в магниевых бездиафрагменных электролизерах / К.Д. Мужжавлев [и др.] // Цветные металлы. – 1980. – № 1. – С. 76–78.
2. Причины разрушения огнеупорных диафрагм в магниевых электролизерах / Н.М. Зуев, Г.М. Шарунова [и др.] // Сб. науч. тр. ВАМИ. – Л., 1968. – № 63. – С. 75–80.

3. Технологический процесс производства отливок из фторфлогопита / М.Н. Игнатов, Е.Н. Шундииков, Н.А. Шундииков, М.М. Николаев, А.М. Игнатова // Современные организационные, технологические и конструкторские методы управления качеством / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – С. 47–52.

4. Производство фторфлогопита и его применение в цветной металлургии / А.М. Игнатова, М.М. Николаев, А.М. Ханов, Н.А. Шундииков // Цветные металлы Сибири – 2009: сб. докл. I Междунар. конф. – Красноярск, 2009. – С. 415–416.

5. Изучение анизотропии симиналов фторфлогопитового типа методами матричного и динамического наноиндентирования / А.М. Игнатова, М.В. Юдин, М.М. Николаев, М.Н. Игнатов // Вестник Перм. ун-та. Геология. – 2012. – № 4(17). – С. 22–29.

6. Характеристика микроструктуры и пористости синтетических минеральных сплавов на примере рентгеновской микротомографии фторфлогопита / М.Н. Игнатов, Д.В. Корост, М.М. Николаев, М.В. Юдин // Вестник Перм. ун-та. Геология. – 2013. – Вып. 2(19). – С. 56–64.

7. Липовский И.Е., Дорофеев В.А. Камнелитейное производство. – М.: Металлургия, 1965. – 199 с.

8. Рашин Г.А., Четвериков С.Д. Петрохимический метод оценки сырья для каменного литья // Известия вузов. Геология и разведка. – 1964. – № 9. – С. 71–79.

9. Рашин Г.А. Возможности управляемого минералообразования в петроургии // Проблемы каменного литья: сб. – Киев: Изд-во АН УССР, 1968. Вып. 2. – С. 122–131.

10. Затвердевание и кристаллизация каменного литья / Б.Х. Хан, И.И. Быков, В.П. Кораблин, С.В. Ладохин. – Киев: Наук. думка, 1969. – 163 с.

11. Wellwood G.A., Rodda D.P. Utilization of fluoride and sodium values from calcined spent potlining // Light Metals. – 1994. – Vol. 93. – P. 261–267.

12. Benetsand success factors of regional resource synergies in Gladstone / C.D. Corder, D. van Beers, J. Lay, R. van Berkel // Green Processing Conference. – Australia, 2006. – P. 83–92.

13. Welch B.J. Inert anodes – the status of the materials science, the opportunities they present and the challenges that need resolving before commercial implementation // Light Metals. – 2009. – Vol. 38. – P. 971–978.

14. Feng Naixiang, Tian Yingfu, Peng Jianping. New cathodes in aluminum reduction cells // Light Metals. – 2010. – P. 405–410.

15. Shaofeng F. Technology study in 200ka pots using novel cathodes with Ridges // Journal of Materials and Metallurgy. – 2010. – Vol. 9. – P. 23–29.

References

1. Muzhzhavlev K.D. et al. Novyi printsip komponovki elektrodov v magnievyykh bezdiaphragmennykh elektrolizerakh [The new principle of configuration of electrodes in magnesian the bezdia-fragmennykh electrolyzers]. *Tsvetnye metally*, 1980, no. 1, 76–78 pp.

2. Zuev N.M., Sharunova G.M. et al. Prichiny razrusheniia ogneupornykh diafragm v magnievyykh elektrolizerakh [Causes of destruction of fire-resistant diaphragms in magnesian electrolyzers]. *Sbornik nauchnykh trudov VAMI*. Leningrad, 1968, no. 63, 75–80 pp.

3. Ignatov M.N., Shundikov E.N., Shundikov N.A., Nikolaev M.M., Ignatova A.M. Tekhnologicheskii protsess proizvodstva otlivok iz ftorflogopita [Technological process of production of castings of a ftorflogopit]. *Sovremennye organizatsionnye, tekhnologicheskie i konstruktorskie metody upravleniia kachestvom*. Perm'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Perm', 2006, 47–52 pp.
4. Ignatova A.M., Nikolaev M.M., Khanov A.M., Shundikov N.A. Proizvodstvo ftorflogopita i ego primenenie v tsvetnoi metallurgii [Production of a ftorflogopit and its application in color metallurgy]. *Tsvetnye metally Sibiri*, 2009: sbornik dokladov I Mezhdunarodnoi konferentsii. Krasnoiarsk, 2009, 415–416 pp.
5. Ignatova A.M., Iudin M.V., Nikolaev M.M., Ignatov M.N. Izuchenie anizotropnosti siminalov ftorflogopitovogo tipa metodami matrichnogo i dinamicheskogo nanoindentirovaniia [Studying of anisotropism of siminal of ftorflogopitovy type by methods of a matrix and dynamic nanoindentirovaniye]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2012, no. 4(17), 22–29 pp.
6. Ignatov M.N., D.V. Korost D.V., Nikolaev M.M., Iudin M.V. Kharakteristika mikrostruktury i poristosti sinteticheskikh mineral'nykh splavov na primere rentgenovskoi mikrotomografii ftorflogopita [The characteristic of a microstructure and porosity of synthetic mineral alloys on the example of a x-ray microtomography of a ftorflogopit]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2013, iss. 2(19), 56–64 pp.
7. Lipovskii I.E., Dorofeev V.A. Kamneliteinoe proizvodstvo [Kamneliteyny production]. Moscow: Metallurgiya, 1965, 199 p.
8. Rashin G.A., Chetverikov S.D. Petrokhimicheskii metod otsenki syr'ia dlia kamennogo lit'ia [Petrochemical method of an assessment of raw materials for stone casting]. *Izvestiia vuzov. Geologiya i razvedka*, 1964, no. 9, 71–79 pp.
9. Rashin G.A. Vozmozhnosti upravliaemogo mineraloobrazovaniia v petrurgii [Possibilities of the operated mineralogenesis in a petrurgiya]. *Problemy kamennogo lit'ia: sbornik*. Kiev: Izdatel'stvo Akademii Nauk Ukrainskoi Sovetskoi Sotsialisticheskoi Respubliki, 1968. iss. 2, 122–131 pp.
10. Khan B.Kh., Bykov I.I., Korablin V.P., Ladokhin S.V. Zatverdevanie i kristallizatsiia kamennogo lit'ia [Hardening and crystallization of stone casting]. Kiev: Nauk. dumka, 1969, 163 p.
11. Wellwood G.A., Rodda D.P. Utilization of fluoride and sodium values from calcined spent potlining. *Light Metals*, 1994, vol. 93, 261–267 pp.
12. Corder C.D., D. van Beers, Lay J., R. van Berkel. Benetsand success factors of regional resource synergies in Gladstone. *Green Processing Conference*. Australia, 2006, 83–92 pp.
13. Welch B.J. Inert anodes – the status of the materials science, the opportunities they present and the challenges that need resolving before commercial implementation. *Light Metals*, 2009, vol. 38, 971–978 pp.
14. Feng Naixiang, Tian Yingfu, Peng Jianping. New cathodes in aluminum reduction cells. *Light Metals*, 2010, 405–410 pp.
15. Shaofeng F. Technology study in 200ka pots using novel cathodes with Ridges. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2010, vol. 9, 23–29 pp.

Получено 5.04.2017

Об авторах

Юдин Максим Владимирович (Березники, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, заместитель начальника цеха ПАО «Корпорация “ВСМПО-Ависма”»; e-mail: yudinmax1313@yandex.ru.

Николаев Михаил Михайлович (Березники, Россия) – лауреат Государственной премии Казахской ССР, заслуженный рационализатор Казахской ССР, заслуженный изобретатель Казахской ССР и почетный изобретатель МЦМ СССР.

Игнатова Анна Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института безопасности труда, производства и человека Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: anutapages@ gmail.com.

Игнатов Михаил Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iamptu@ gmail.com.

About the authors

Maxim V. Yudin (Berezniki, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, Deputy Head of the Department, Public Stock Company “VSMPO-Avisma Corporation”; e-mail: yudinmax1313@ yandex.ru.

Mikhail M. Nikolaev (Berezniki, Russian Federation) – Winner of the State Prize of the Kazakh SSR, Honored Innovator of the Kazakh SSR, Honored Inventor of the Kazakh SSR and USSR, Honored Inventor of MCM.

Anna M. Ignatova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Leading Researcher, Occupational Safety Institute, Production and Human, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: anutapages@gmail.com.

Mikhail N. Ignatov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iamptu@gmail.com.