

Игнатова А.М., Юдин М.В., Игнатов М.Н. Размерные параметры технологического процесса получения литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 47–55. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.06

Ignatova A.M., Yudin M.V., Ignatov M.N. Dimensional parameters of the technological process of obtaining cast molded crystalline materials of the fluorflogopite type // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 47–55. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.06

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 21, № 2, 2019**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.06

УДК 669.74

**А.М. Игнатова, М.В. Юдин, М.Н. Игнатов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**РАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ  
СЛЮДОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ФТОРФЛОГОПИТОВОГО ТИПА**

Литые слюдокристаллические материалы фторфлогопитового типа являются перспективной альтернативой традиционным огнеупорам для электролизеров в цветной металлургии. Использование литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа в электролизном способе получения металлического магния позволяет сразу решить несколько актуальных проблем, связанных с быстрым износом футеровочной кладки. Прежде всего благодаря применению литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа снижаются расходы на ремонт и время диагностического простоя оборудования, повышается чистота металлического расплава, так как литые слюдокристаллические материалы фторфлогопитового типа практически не взаимодействуют с компонентами среды электролизной ванны. Длительный срок службы обеспечивается низкой смачиваемостью поверхности литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа расплавом жидкого магния. Однако существующие технологические решения и параметры технологического процесса получения этих материалов не обеспечивают необходимый уровень выхода годной продукции и являются в значительной степени опасными для экологической обстановки и здоровья производственного персонала. Уточняются размерные параметры технологического процесса получения литых слюдокристаллических материалов, которые обеспечивают повышение выхода годной продукции, а также позволяют усилить экологическую безопасность данного производства. Показана практическая значимость таких решений, как предварительное гранулирование шихтовых смесей перед загрузкой в плавильную электродуговую однофазную печь и использование многоуровневой системы очистки отходящих газов. Показано, что выбор оптимальных размерных параметров технологического процесса позволяет нейтрализовать действие наиболее опасного побочного продукта – хлористого водорода – до уровня, который позволяет сохранить здоровье работающих и предотвратить нанесение непоправимого экологического ущерба территории предприятия и близлежащим населенным пунктам и одновременно повысить производительность и качество продукции.

**Ключевые слова:** слюдокристаллический материал, огнеупоры, плавление, расплав, электрическая дуга, электродуговая печь, фторфлогопит, фтористый водород, очистка газов, адсорбция, термическая обработка, гранулирование, шихтоподготовка, проектирование литейных цехов.

**A.M. Ignatova, M.V. Yudin, M.N. Ignatov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**DIMENSIONAL PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF OBTAINING CAST  
MOLDED CRYSTALLINE MATERIALS OF THE FLUORFLOGOPITA TYPE**

Fluoroflogopite type molded glass-ceramic materials are promising alternatives to traditional refractories for electrolyzers in non-ferrous metallurgy. The use of cast glass-crystalline fluoroflogopite-type materials in the electrolysis method of producing metallic magnesium allows us to solve several urgent problems associated with the rapid deterioration of the lining of electrolyzers. First of all, when using glass-crystalline fluoroflogopite-type materials, the cost of repairs and diagnostic equipment downtime are reduced, the purity of the main products increases, since the glass-crystalline fluoroflogopite-type materials practically do not interact with the components of the electrolysis bath medium. Long service life is ensured by low surface wettability of molten mica-crystalline fluoroflogopite-type materials by molten liquid magnesium. However, the existing technological solutions and technological process parameters do not provide the necessary level of yield of products and are largely dangerous for the environmental situation and the health of production personnel. The article specifies the dimensional parameters of the technological process of obtaining cast micaceous crystalline materials, which provide an increase in the yield of useful products, as well as help to enhance the environmental safety of this production. The practical utility of such solutions as preliminary granulation of charge mixtures before loading into a single-phase melting electric arc furnace and using a multi-level exhaust gas cleaning system is shown. It is shown that the choice of optimal dimensional parameters of the technological process allows to neutralize the effect of the most dangerous byproduct hydrogen chloride to a level that allows to preserve the health of workers and prevent irreparable environmental damage to the territory of the enterprise and nearby settlements simultaneously with increasing productivity and product quality.

**Keywords:** mica-crystalline material, refractory materials, melting, melt, electric arc, electric arc furnace, fluoroflogopite, hydrogen fluoride, gas cleaning, adsorption, heat treatment, granulation, charge preparation, design of foundries.

Использование литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа в качестве футеровки электролизеров в цветной металлургии является перспективным направлением модернизации данной отрасли. Многочисленные работы авторов [1–8] и их предшественников [9–14] указывают на то, что использование этих материалов продлевает срок службы футеровки электролизеров в 2–3 раза, что является значительным конкурентным преимуществом. Свойством, обеспечивающим длительную стойкость литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа в агрессивных условиях электролиза магния, является низкая смачиваемость к магниевому расплаву. Однако существующие технологические решения получения литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа до настоящего времени не обеспечивают необходимый уровень выхода годной продукции и экологическую безопасность производства.

Целью настоящего исследования является уточнение размерных параметров технологического процесса получения литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа для повышения выхода годной продукции, снижения экологической нагрузки на окружающую среду и степени риска для здоровья работающих.

Литой слюдокристаллический материал фторфлогопитового типа, или синтетический калиевый фторфлогопит имеет следующую кристаллохимическую формулу:  $KMg_3[Si_3AlO_{10}]F_2$ . Плавка ведется при температуре от 1380 до 1720 °С, в результате химического взаимодействия компонентов шихты – оксидов магния, кремния, алюминия и калия – в присутствии ионов фтора образуется расплав, при затвердевании и кристаллизации которого образуется материал следующего состава, мас. %:  $SiO_2$  – 39–43,  $Al_2O_3$  – 9–12,  $MgO$  – 27–30,  $K_2O$  – 7–9,  $F$  – 9–12, со структурой, включающей трехмерные слоистые комплексы.

Получение расплава слюдокристаллического материала рекомендовано осуществлять в электрических однофазных плавильных электродуговых печах.

В рамках данной работы плавку шихты проводили в однофазной электродуговой печи емкостью 350 кг с графитовым электродом.

Однофазные дуговые электропечи для получения расплава слюдокристаллических материалов представляют собой вертикально расположенный водоохлаждаемый тигель, оснащенный наклонным механизмом на 80° или 110° для слива расплава в ковш или изложницу. Нижняя полость кокиля закрыта графитовым электродом диаметром 400 мм,

а верхняя – металлической крышкой с боковым патрубком для забора выделяемых в процессе плавки газовых и пылевых загрязнений. Сверху через отверстие в крышке вводится верхний подвижный электрод. Оба электрода изолированы от массы расплава в печи. Печь работает на гарнисаже. Это значит, что конструкция печи не предусматривает футеровки, но благодаря интенсивному водяному охлаждению на стенках печи образуется корка застывшего расплава, которая выполняет функцию футеровки и электроизоляции. После плавки гарнисаж легко отделяется от поверхности стенки.

Загрузка шихты в печь осуществляется с помощью аппаратного комплекса, состоящего из расходного бункера, вибропитателя и воронки с поворотной заслонкой для дозирования порции загружаемой шихты.

При предварительной подготовке шихты элементом модернизации технологического процесса является использование аспирационных отсосов и систем забора пылевой фракции на данном этапе. Подобная система также предусмотрена в зоне выпуска расплава из печи в ковш. Газы и пылевая взвесь, вынесенные из печи при приготовлении расплава, а также при выпуске расплава в ковш и разливке расплава из ковша в кокиля, собираются в общий коллектор и подаются на одну из линий очистки.

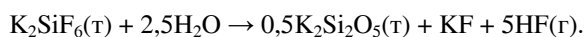
Элементом уточнения размерного параметра технологического процесса является этап подготовки шихтовых материалов. Взвешенные в заданных соотношениях составляющие сырьевой композиции смешивают, добавляют связующее (лигносульфонаты и воду), брикетируют и сушат. Влажность шихты, оптимальная для брикетирования, составляет 3–8 %. Сушку брикетированной шихты осуществляют в конвейерных или шахтных печах при температуре  $(150–250) \pm 50$  °С.

Процессы, протекающие в сырьевой композиции для получения литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа при нагревании и плавлении, являются отправными данными для уточнения размерных параметров технологического процесса.

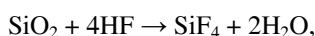
Гранулометрический состав шихты на 1/3 состоит из мелкодисперсного порошка глинозема (средний размер частиц 50–70 мкм) и калия кремнефтористого (средний размер частиц 440–200 мкм), а большая часть шихты – на 2/3 из кварцевых зерен со средним размером 0,5–1,2 мм и зерен периклаза со средним размером 1–3 мм. Реакции силикатообразования идут на поверхности периклазовых и кварцевых зерен. Растворение основной массы зерен кварцевого песка начинается у поверхности

трещин, образовавшихся в результате полиморфных превращений и термического удара, чего не наблюдается у периклаза. Скорости процесса растворения благоприятствуют низкие поверхностное натяжение и вязкость расплава, облегчающие его проникание в трещины зерен.

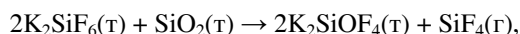
На ранних стадиях нагревания при температуре 100–400 °С происходит разложение гидроксидных соединений. Выделяющиеся пары воды при высоких значениях температуры ведут себя как минерализаторы, т.е. ускоряют ход реакций в направлении образования сложных новых соединений. При появлении паров воды происходит значительное ускорение твердофазных реакций между компонентами шихты. При температуре 400–450 °С начинается стадия твердофазных реакций, приводящих к появлению новых соединений (HF, KF, KAlF<sub>4</sub> и др.). Взаимодействие паров воды с кремнефтористым калием вызывает его пиролиз:



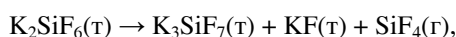
Образовавшийся HF из-за сильной сольватации фтор-иона реагирует с компонентами шихты с образованием фторидов и оксифторидов. Взаимодействие кремнезема с HF при температуре 250–400 °С увеличивает количество паров воды в процессе:



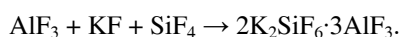
а с кремнефтористым калием приводит к ускорению его термического разложения:



которое заканчивается при 550–600 °С. С повышением температуры до 500–600 °С кремнефтористый калий интенсивно разлагается:



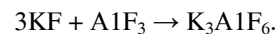
выделяя в газовую фазу летучие фториды (SiF<sub>4</sub>) и образуя промежуточные соединения (K<sub>3</sub>SiF<sub>7</sub>, KF). Взаимодействие этих соединений с компонентами шихты (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO) приводит к образованию новых соединений и легкоплавких эвтектик (KAlF<sub>4</sub>, K<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, KMgF<sub>3</sub> и др.):



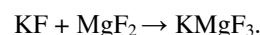
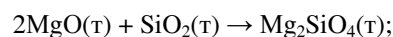
Интенсивному протеканию твердофазных реакций способствует также процесс полиморфного превращения кварца при температуре 573 °С, которое сопровождается увеличением объема зерен кварцевого песка на 2,4 %.

С появлением расплава ускоряется химическое взаимодействие на пограничной поверхности фаз. При одновременном участии в процессе газовой (пары воды и летучие фториды) и жидкой фаз интенсивность массопередачи значительно возрастает.

При этом увеличивается каталитическая активность зерен периклаза с кварцевым песком, а количество жидкой фазы увеличивается за счет плавления легкоплавких эвтектик, образуются силикаты и другие соединения:

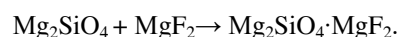
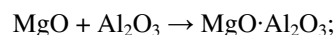
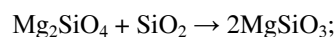


Калий кремнефтористый и глинозем к этому времени в полном объеме реагируют между собой. Повышение температуры до 700–800 °С приводит к увеличению количества K<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, начинается образование форстерита и других соединений:

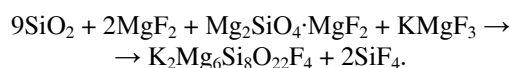


При 800 °С отмечено образование небольшого количества четырехкремниевой слюды (K<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>20</sub>F<sub>4</sub>) и калиевого фторфлогопита (KMg<sub>3</sub>[Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>]F<sub>2</sub>).

Возникшие силикаты и непрореагировавшие компоненты вместе с жидкой фазой образуют плотную спекшуюся массу. Спек с повышением температуры до 900–1000 °С плавится, количество жидкой фазы увеличивается, она становится преобладающей. При температуре выше 900 °С завершаются реакции силикатообразования, в расплаве идет медленное, постепенное растворение зерен периклаза и кварцевого песка. Образовавшиеся простые и сложные алюмосиликаты калия и магния с участием фторидов (KF, MgF<sub>2</sub>, SiF<sub>4</sub> и др.) образуют форстерит, лейцит, калиофиллит и другие соединения:



Калиевый фторфлогопит по своей природе является комплексным соединением переменного состава, и синтез его осуществляется через образование ряда промежуточных соединений:



Плавление завершается при температуре 1150–1200 °С. Гомогенизация расплава происходит при более высокой температуре 1300–1400 °С, при этом вязкость фторфлогопитового расплава достигает оптимального минимального значения 0,85–0,4 Па·с.

Технически процесс плавления начинается с нижних слоев. Шихта, находящаяся на поверхности расплава, является теплоизолятором. В плавильной печи при полностью закрытом зеркале расплава шихтой тепло, необходимое для нагрева и расплавления шихты, передается от расплава че-

рез нижнюю поверхность слоя шихты и от газов, проходящих через этот слой. Газы, образовавшиеся в процессе плавки (CO, CO<sub>2</sub> и др.), и летучие соединения (H<sub>2</sub>O, HF, KF, SiF<sub>4</sub> и др.), выделившиеся из шихты и расплава, проходя через слой шихты, отдают ей свое тепло, нагревая ее на 150–200 °С. Летучие соединения при прохождении слоя шихты абсорбируются и конденсируются на частицах шихты, способствуя прохождению твердофазных реакций и ускоряя их, что значительно уменьшает их потери.

Описанные процессы происходят на существующем оборудовании по существующей технологии. Однако если в технологическом процессе применить методы нанотехнологии по принципу сверху-вниз, то это позволит приготовить шихту лучшего качества, ускорить время получения расплава, а главное, улучшить структуру и качество материала литых изделий, что повысит их коррозионную стойкость в расплавах хлоридов при эксплуатации в аппаратах и агрегатах получения магния и титана.

Механические и химические свойства литого стеклокристаллического материала фторфлогопитового типа зависят от строения материала и особенностей его структуры [15–17]. Единственный способ изменить структуру материала – изменить параметры технологического процесса, в результате получив новые показатели свойств.

Взаимосвязь свойств фторфлогопита и параметров технологического процесса показана в табл. 1.

Таблица 1

Взаимосвязь технологических параметров и структурных характеристик литого стеклокристаллического материала фторфлогопитового типа

№ п/п	Параметр технологического процесса	Характеристика
1	Состав шихты	Фазовый состав, структура
2	Температура заливки	Объемная усадка, структура отливок
3	Температура формы	Строение контактной и транс-кристаллитной зон отливок, их протяженность
4	Температура и время охлаждения и кристаллизации расплава в форме	Структура, механические свойства, термостойкость, термо-расплавоустойчивость
5	Температура и время отжига	Прочностные и термические характеристики, зависящие от наличия межфазных напряжений в материале, и степень деформированности кристаллов

Между температурой заливки расплава и структурой полученных отливок имеется непосредственная связь: с повышением температуры заливки размер структурных составляющих закономерно увеличивается, также увеличивается протяженность переходной зоны (при 1520 °С – от 30 до 35 мм). Кроме того, появляется остеклование в углах и на гранях отливок, т.е. в местах наибольшего переохлаждения расплава. В отливках, полученных при температуре заливки свыше 1600 °С, остеклование имеется практически на всех углах и в некоторых местах на гранях, а при значениях температуры заливки ниже 1500 °С остеклования удастся полностью избежать.

Наиболее значимыми и важными для уточнения размерных параметров технологического процесса являются этапы обработки расплава и отливок после заливки [18–23].

В зависимости от массы и габаритов отливки выдерживают в форме до затвердевания поверхностного слоя и приобретения необходимой для транспортирования прочности в течение 5–50 мин, извлекают из форм и горячими помещают в термическую печь на отжиг с начальной температурой в рабочем пространстве печи от 900 до 950 °С. После отжига отливки очищают, подвергают обработке, контролю размеров согласно чертежу на изделие, контрольной сборке на стенде для контрольной сборки защитного пояса электролизера.

Термическая обработка проводится в электропечи, проводится изотермическая выдержка изделий при температуре от 900 до 950 °С в течение 2 ч, и обеспечивается режим охлаждения изделий со скоростью от 30 до 60 °С/ч в зависимости от массы и конфигурации изделий.

Отливки устанавливают на под выдвигной печи в том положении, в котором они находились в литейной форме.

Охлаждение отливок происходит вместе с печью. Время охлаждения отливок в печи до температуры от 50–80 °С продолжается не менее 22 ч.

После прохождения процедуры отжига отливки, изготовленные методом литья в формы из холодно-твердеющих смесей, с помощью грузозахватных клещей краном извлекаются из печи и устанавливаются на решетку выбивную инерционную для более тщательной очистки отливки от формовочной смеси. Отливки, изготовленные методом литья в кокиль, после извлечения из печи также транспортируются на гидравлической тележке на склад готовой продукции для механической обработки.

Опытным и лабораторным путем в работе были установлены размерные параметры указанных в статье технологических процессов получения литых стеклокристаллических материалов фторфлогопитового типа (табл. 2).

Таблица 2

Размерные параметры указанных в статье технологических процессов получения литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа

Наименование технологического параметра	Единица измерения	Значение
<b>Подготовка шихтовых материалов</b>		
Содержание основного вещества в компонентах: SiO <sub>2</sub> в кварцевом песке	мас. %	95,0–98,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в глиноземе, не менее	мас. %	98,34
MgO в периклазе	мас. %	90–92
K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> в калии кремнефтористом	мас. %	97–99
Массовая доля влаги в обогащенном кварцевом песке, не более	%	1,0
Массовая доля влаги в глиноземе, не более	%	2,5
Изменение массы при прокаливании периклазового порошка, не более	%	1,0
Массовая доля потери при высушивании калия кремнефтористого, не более	%	10
Температура сушки кварцевого песка и периклазового порошка	°С	250±50
Время сушки кварцевого песка и периклазового порошка	ч	1–2
Вакуумметрическое давление (разрежение) в системе аспирации печи при сушке компонентов шихты	Па (кПа)	–500–(–700) –0,5–(–0,7)
<b>Приготовление шихты</b>		
Масса одного замеса шихты в смесительной машине	кг	250
Температура подогрева лигносульфонатов	°С	60–80
Время смешивания компонентов шихты, не менее	мин	20
Влажность шихты в машине смесительной	%	3–8
Температура подсушки брикетов шихты	°С	(150–250)±50
Время сушки брикетов шихты в печи шахтной, не менее	ч	2
Влажность брикетированной шихты после сушки	%	0,1–0,5
<b>Приготовление расплава</b>		
Температура расплава в печи при плавке: начало	°С	1380
окончание	°С	1600–1720
Отношение шихты к возврату собственного производства, % не более	–	70:30
Подъем сводового электрода над подом при плавке, не более	мм	170
Объем отходящих газов из печи	нм <sup>3</sup> /ч	800–1100
Давление воды в системе охлаждения печи	МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,3–0,4 (3–4)
Температура воды на входе в систему охлаждения печи	°С	20–30
Температура воды на выходе из системы охлаждения печи	°С	35–45
Расход воды: на охлаждение кожуха печи для приготовления фторфлогопита	м <sup>3</sup> /ч	2,5–4,0
общий трубопровод из бака холодной воды в подающий коллектор на охлаждение печи и в бак горячей воды	м <sup>3</sup> /ч	до 15
Вакуумметрическое давление (разрежение) в системе отсоса печи	Па (кПа)	–800–(–1100) –0,8–(–1,1)
Размер кристаллов фторфлогопита в технологической пробе	мм	0,1–5,0
<b>Выпуск расплава из печи и заливка литейных форм</b>		
Температура прогрева кокилей	°С	150–200
Температура расплава после выпуска из печи в ковш	°С	1600–1700
Время дегазации расплава в разливочном ковше, не более	мин	2
Температура расплава в ковше при заливке в литейные формы	°С	1500–1600
Продолжительность заполнения литейных форм	с	15–100

Продолжение табл. 2

Наименование технологического параметра	Единица измерения	Значение
Продолжительность кристаллизации расплава в литейной форме: в графитовом кокиле в форме из ХТС	мин	15–30
	мин	25–50
Вакуумметрическое давление (разрежение) в системе аспирации разливочного плаца	Па (кПа)	–300–(–450) –0,3–(–0,45)
Вакуумметрическое давление (разряжение) в системе аспирации литейно-формовочного плаца и решетки выбивной	Па (кПа)	–3000–(–3800) –3,0–(–3,8)
<b>Термическая обработка отливок</b>		
Температура отливок перед отжигом, не менее	°С	800
Температура изотермической выдержки отливок в печи	°С	900–950
Время изотермической выдержки отливок при температуре 900 °С	ч	2
Время охлаждения отливок в печи, не менее	ч	22
Температура печи при извлечении отливки	°С	50–80
Вакуумметрическое давление (разрежение) в системе отсоса печи с выдвижным подом	Па (кПа)	–200–(–550) –0,2–(–0,55)
<b>Очистка отходящих газов</b>		
<b>Газы, поступающие на очистку в циклон</b>		
Объемный расход газов, поступающих на очистку от всех источников выделений, не более	м <sup>3</sup> /ч	20 000
Температура газов, поступающих на очистку в циклоны от плавильной печи, не более	°С	100
Скорость газа, не менее	м/с	4,0
Массовая концентрация пыли в отходящих газах, поступающих на очистку от всех источников выделений, не более	г/м <sup>3</sup>	0,46
Вакуумметрическое давление (разрежение) в газоходе перед циклоном	Па (кПа)	–800–(–1500) (–0,8–(–1,5))
Давление сжатого воздуха на вводе в отделение	МПа	0,55–0,65
<b>Очистка газов в абсорбере</b>		
Температура газов после циклона, не более	°С	100
Массовая концентрация пыли, поступающей после циклона в абсорбер, не более	г/м <sup>3</sup>	0,01
Массовая концентрация фтористых соединений в газах после циклона (в пересчете на фтор), не более	г/м <sup>3</sup>	0,036
Вакуумметрическое давление (разрежение) в газоходе между циклоном и абсорбером	Па (кПа)	–1100–(–1800) –1,1–(–1,8)
Рабочий уровень содового раствора в циркуляционном баке (от верха): верхний уровень, не менее нижний уровень, не более	мм	200
	мм	500
Начальная концентрация раствора по содержанию Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	г/л	30–50
Конечная концентрация раствора по содержанию Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , не менее	г/л	5,0
рН содового раствора в циркуляционном баке	ед.	8–12
Давление содового раствора в трубопроводе после циркуляционных насосов	МПа	0,2–0,32
Рабочий уровень содового раствора (от верха наливного патрубка) в абсорбере: верхний уровень, не менее нижний уровень, не более	мм	1200
	мм	1500
Масса кальцинированной соды	кг	175–200
Рабочий уровень суспензии нерастворимого осадка в кубеле бака-отстойника (от верха кубеля), не более	мм	100
Уровень суспензии в приемке на отметке –0,400 газоочистки: от верха, не менее от низа, не менее	мм	200
	мм	300

Наименование технологического параметра	Единица измерения	Значение
<b>Газы, отходящие в атмосферу после очистки</b>		
Объемный расход газов при нормальных условиях, не более	м <sup>3</sup> /ч	20 000
Массовая концентрация вредных веществ при расходе отходящих газов 20 000 м <sup>3</sup> /ч, не более: газообразных фторидов (в пересчете на фтор) пыли, не более	г/м <sup>3</sup> г/м <sup>3</sup>	0,0018 0,01*
Температура отходящих газов в общем газоходе после абсорбера	°С	40–60
Вакуумметрическое давление (разрежение) в системе отсоса в общем газоходе после абсорбера	Па (кПа)	–2000–(–3500) –2,0–(–3,5)

Таким образом, в работе уточнены размерные параметры всех этапов технологического процесса получения литых слюдокристаллических материалов фторфлогопитового типа, для повышения выхода годной продукции рекомендовано введение операции предварительной грануляции компонентов шихты со связующим, для снижения экологической нагрузки на окружающую среду предложены размерные параметры газоочистки и использование аспирационных насосов.

#### Список литературы

1. Последовательность фазовоструктурных превращений при плавке фторфлогопитовой шихты / М.В. Юдин, М.М. Николаев, А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 42–52.
2. Функциональная и технологическая схема производства фторфлогопитовых изделий / М.В. Юдин, М.М. Николаев, А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 118–132.
3. Юдин М.В., Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Идентификация калиевого фторфлогопита опытной партии на предмет соответствия стандарту // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 73–81.
4. Изучение анизотропности симиналов фторфлогопитового типа методами матричного и динамического наноиндентирования / А.М. Игнатова, М.В. Юдин, М.М. Николаев, М.Н. Игнатов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2012. – № 4(17). – С. 22–29.
5. Характеристика микроструктуры и пористости синтетических минеральных сплавов на примере рентгеновской микротомографии фторфлогопита / А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов, Д.В. Корост, М.М. Николаев, М.В. Юдин // Вестник Пермского университета. Геология. – 2013. – № 2(19). – С. 56–64.
6. Исследование анизотропии фторфлогопита методами матричного и динамического наноиндентирования / М.Н. Игнатов, А.М. Игнатова, М.В. Юдин,

М.М. Николаев, А.М. Ханов // Комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых. – 2011. – С. 55–56.

7. Игнатова А.М., Юдин М.В., Игнатов М.Н. Идентификация структурных составляющих синтетических минеральных сплавов методом наноиндентирования и наносклерометрии // Будущее машиностроения России: сб. тр. VI Всерос. конф. молод. ученых и специалистов. – 2013. – С. 306–308.

8. Мониторинг традиционных огнеупоров и жаростойких бетонов для футеровки агрегатов производства магния и титана / М.В. Юдин, М.М. Николаев, А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов // Master's Journal. – 2017. – № 1. – С. 73–81.

9. Лебедев О.А., Брусаков И.Ю., Шкуряков Н.П. Оптимизация технологического режима при электролитическом получении магния // Цветные металлы. – 2006. – № 1. – С. 54–57.

10. Щеголев В.И., Лебедев О.А. Электролитическое получение магния. – М.: Руда и металлы, 2002. – 366 с.

11. Гладикова Л.А., Тетерин В.В., Фрейдлина Р.Г. Получение оксида магния из растворов кислотной переработки серпентинита // Журнал прикладной химии. – 2008. – Т. 81, № 5. – С. 852.

12. Яковлева Г.А., Пилецкая Ж.В., Минина Р.Г. О режимных параметрах электролитического получения магния // Цветные металлы. – 2010. – № 8. – С. 55–58.

13. Лорян В.Э., Качин А.Р., Уваров В.И. Синтез в режиме горения слюдокристаллических материалов на основе фторфлогопита с использованием минерального сырья и отходов алюминиевого производства // Перспективные материалы. – 2017. – № 2. – С. 72–78.

14. Эпитаксиальная стабилизация брукита в островковых пленках TiO<sub>2</sub> на фторфлогопите / В.М. Иевлев, А.В. Костюченко, С.Б. Кушев, А.А. Синельников, С.А. Солдатенко // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2012. – № 16(42). – С. 081–083.

15. Александрова Т.Н., Рассказов И.Ю., Литвинова Н.М. К вопросу получения огнеупорных материалов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 4–5. – С. 52–53.

16. Горшков А.С., Мартыненко Г.М. Применение прогрессивных материалов при строительстве и проек-

тировании агрегатов цветной металлургии // Новые огнеупоры. – 2007. – № 1. – С. 5–8.

17. Перспективы применения алюмосиликатных огнеупоров для алюминиевых электролизеров. Ч. 3. О роли стеклофазы, образующейся при работе алюминиевого электролизера / В.В. Шарапова, Б.П. Серeda, Д.Ю. Богуславский, И.П. Малышев, В.Д. Троян, Н.А. Трошенков // Новые огнеупоры. – 2007. – № 12. – С. 10–12.

18. Свойства футеровочных материалов для электролизеров производства первичного алюминия / А.В. Прошкин, А.М. Погодаев, П.В. Поляков, В.В. Пингин, И.А. Ярош // Новые огнеупоры. – 2008. – № 3. – С. 96–102.

19. Патрин Р.К., Бажин В.Ю. Отработанная футеровка алюминиевого электролизера как сырье для металлургической, химической и строительной промышленности // Металлург. – 2014. – № 8. – С. 28–31.

20. Петровский А.А., Немчинова Н.В., Ржевицкий Э.П. Изучение процесса извлечения фтора из огнеупорной части отработанной футеровки электролизеров производства алюминия // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 8(139). – С. 151–162.

21. Игнатова А.М., Юдин М.В. Исследование стойкости огнеупорных материалов к пропитке в хлоридных расплавах // Химия. Экология. Урбанистика: материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Пермь, 18–19 апреля 2019 г. – С. 303–307.

22. Игнатова А.М., Юдин М.В. Исследование терморасплавоустойчивости литого слюдокристаллического материала фторфлогопитового типа // Химия. Экология. Урбанистика: материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Пермь, 18–19 апреля 2019 г. – С. 307–312.

23. Игнатова А.М., Юдин М.В. Конструктивные особенности плавильной электродуговой печи для получения расплава литых слюдокристаллических материалов // Химия. Экология. Урбанистика: материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Пермь, 18–19 апреля 2019 г. – С. 312–316.

## References

1. Iudin M.V., Nikolaev M.M., Ignatova A.M., Ignatov M.N. Posledovatel'nost' fazovostrukturykh prevrashchenii pri plavke fторфлогopитовой shikhtы [Sequence of phase-structural transformations at melting of fluorofluoropite charge]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 42–52.

2. Iudin M.V., Nikolaev M.M., Ignatova A.M., Ignatov M.N. Funktsional'naia i tekhnologicheskaiя skhema proizvodstva fторфлогopитovykh izdelii [Functional and technological scheme of production of fluorofluoropite products]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 118–132.

3. Iudin M.V., Ignatova A.M., Ignatov M.N. Identifikatsiя kalievogo fторфлогopита opыtnoi partii na predmet sootvetstviя standartu [Identification of potassium fluoro-

fluorofluoride in the pilot batch for compliance with the standard]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 73–81.

4. Ignatova A.M., Iudin M.V., Nikolaev M.M., Ignatov M.N. Izuchenie anizotropnosti siminalov fторфлогopитового tipa metodami matrichnogo i dinamicheskogo nanoindentirovaniя [Study of anisotropy of fluorofluoropite type siminals by matrix and dynamic nanoindentation]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2012, no. 4(17), pp. 22–29.

5. Ignatova A.M., Ignatov M.N., Korost D.V., Nikolaev M.M., Iudin M.V. Kharakteristika mikrostruktury i poristosti sinteticheskikh mineral'nykh splavov na primere rentgenovskoi mikrotomografii fторфлогopита [Characteristics of microstructure and porosity of synthetic mineral alloys on the example of X-ray microtomography of fluorofluorofluoride]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2013, no. 2(19), pp. 56–64.

6. Ignatov M.N., Ignatova A.M., Iudin M.V., Nikolaev M.M., Khanov A.M. Issledovanie anizotropii fторфлогopита metodami matrichnogo i dinamicheskogo nanoindentirovaniя [Investigation of fluorofluorofluoride anisotropy by matrix and dynamic nanoindentation]. *Kompleksnoe izuchenie i otsenka mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh*, 2011, pp. 55–56.

7. Ignatova A.M., Iudin M.V., Ignatov M.N. Identifikatsiя strukturykh sostavliayushchikh sinteticheskikh mineral'nykh splavov metodom nanoindentirovaniя i nanosklerometrii [Identification of structural components of synthetic mineral alloys by nanoindentation and nanosclerometry]. *Budushchee mashinostroeniя Rossii: sb. tr. VI Vseros. konf. molod. uchenykh i spetsialistov*, 2013, pp. 306–308.

8. Iudin M.V., Nikolaev M.M., Ignatova A.M., Ignatov M.N. Monitoring traditsionnykh ogneuporov i zharnostoykikh betonov dlia futerovki agregatov proizvodstva magniia i titana [Monitoring of traditional refractories and heat-resistant concretes for lining magnesium and titanium production units]. *Master's Journal*, 2017, no. 1, pp. 73–81.

9. Lebedev O.A., Brusakov I.I., Shkuriakov N.P. Optimizatsiя tekhnologicheskogo rezhima pri elektroliticheskom poluchenii magniia [Optimization of the process mode for electrolytic magnesium production]. *Tsvetnye metally*, 2006, no. 1, pp. 54–57.

10. Shchegolev V.I., Lebedev O.A. Elektroliticheskoе poluchenie magniia [Electrolytic magnesium production]. Moscow: Ruda i metally, 2002, 366 p.

11. Gladikova L.A., Teterin V.V., Freidlina R.G. Poluchenie oksida magniia iz rastvorov kislотноi pererabotki serpentinita [Production of magnesium oxide from acid solutions of serpentinite]. *Zhurnal prikladnoi khimii*, 2008, vol. 81, no. 5, pp. 852.

12. Iakovleva G.A., Piletskaia Zh.V., Minina R.G. O rezhimnykh parametrakh elektroliticheskogo poluchenii magniia [On the regime parameters of electrolytic magnesium production]. *Tsvetnye metally*, 2010, no. 8, pp. 55–58.

13. Lorian V.E., Kachin A.R., Uvarov V.I. Sintez v rezhime goreniiя sliudokristallicheskikh materialov na osnove fторфлогopита s ispol'zovaniem mineral'nogo syr'яя i otkhodov aliuminievogo proizvodstva [Synthesis in the combustion mode of micaceous crystalline materials based on fluorofluoride with the use of mineral raw materials and



aluminum production wastes]. *Perspektivnye materialy*, 2017, no. 2, pp. 72–78.

14. Ievlev V.M., Kostiuchenko A.V., Kushchev S.B., Sinel'nikov A.A., Soldatenko S.A. Epitaksial'naia stabilizatsiia brukita v ostrovkovykh plenkakh TiO<sub>2</sub> na fluorofloropite [Epitaxial stabilization of brookite in TiO<sub>2</sub> islet films on fluorofluoropite]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, no. 16(42), pp. 081–083.

15. Aleksandrova T.N., Rasskazov I.Iu., Litvinova N.M. K voprosu polucheniia ognepurnykh materialov [On the issue of obtaining refractory materials]. *Ogneupory i tekhnicheskaia keramika*, 2010, no. 4–5, pp. 52–53.

16. Gorshkov A.S., Martynenko G.M. Primenenie progressivnykh materialov pri stroitel'stve i proektirovanii agregatov tsvetnoi metallurgii [Application of advanced materials in construction and design of non-ferrous metallurgy units]. *Novye ognepory*, 2007, no. 1, pp. 5–8.

17. Sharapova V.V., Sereda B.P., Boguslavskii D.Iu., Malyshev I.P., Troian V.D., Troshenkov N.A. Perspektivy primeneniia aliumosilikatnykh ogneporov dlia aliuminievykh elektrolizerov [Prospects for the use of aluminosilicate refractories for aluminium electrolyzers]. Ch. 3. O roli steklofazy, obrazuiushcheisia pri rabote aliuminieвого elektrolizera. *Novye ognepory*, 2007, no. 12, pp. 10–12.

18. Proshkin A.V., Pogodaev A.M., Poliakov P.V., Pingin V.V., Iarosh I.A. Svoistva futerovochnykh materialov dlia elektrolizerov proizvodstva pervichnogo aliuminiia / [Properties of lining materials for primary aluminium production electrolyzers]. *Novye ognepory*, 2008, no. 3, pp. 96–102.

19. Patrín R.K., Bazhin V.Iu. Otrabotannaia fute-rovka aliuminieвого elektrolizera kak syr'e dlia metallurgicheskoi, khimicheskoi i stroitel'noi promyshlennosti [Waste Aluminium Electrolyser Lining as a Raw Material for the Metallurgical, Chemical and Building Industries]. *Metallurg*, 2014, no. 8, pp. 28–31.

20. Petrovskii A.A., Nemchinova N.V., Rzhechitskii E.P. Izuchenie protsessa izvlecheniia fтора iz ognepurnoi chasti otrabotannoi futerovki elektrolizerov proizvodstva aliuminiia [Study of the process of fluorine extraction from the refractory part of the spent lining of aluminum production electrolyzers]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 8(139), pp. 151–162.

21. Ignatova A.M., Iudin M.V. Issledovanie stoikosti ognepurnykh materialov k propitke v khlordnykh rasplavakh [Investigation of resistance of refractory materials to impregnation in chloride melts]. *Khimiia. Ekologiia. Urbanistika: materialy vsrossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhduarodnym uchastiem. Perm', 18–19 apreliia 2019 g.*, pp. 307–312.

22. Ignatova A.M., Iudin M.V. Issledovanie termorasplavoustoichivosti litogo sludokristallicheskogo materiala

ftorflogopitovogo tipa [Investigation of thermal melt resistance of mica-crystalline micaceous material of fluorofluoropite type]. *Khimiia. Ekologiia. Urbanistika: materialy vsrossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhduarodnym uchastiem, Perm', 18–19 apreliia 2019 g.*, pp. 303–307.

23. Ignatova A.M., Iudin M.V. Konstruktivnye osobennosti plavil'noi elektrodugovoi pechi dlia polucheniia rasplava litykh sludokristallicheskikh materialov [Design features of melting electric arc furnace for melting of cast mica-crystalline materials]. *Khimiia. Ekologiia. Urbanistika: materialy vsrossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhduarodnym uchastiem, Perm', 18–19 apreliia 2019 g.*, pp. 312–316.

Получено 07.03.19

Опубликовано 20.06.19

#### Сведения об авторах

**Игнатова Анна Михайловна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Пермского краевого центра охраны труда Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iamstu@gmail.com.

**Юдин Максим Владимирович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: yudinmax1313@yandex.ru.

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

#### About the authors

**Anna M. Ignatova** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Science, Leading Researcher, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iamstu@gmail.com.

**Maxim V. Yudin** (Perm, Russian Federation) – Post-graduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: yudinmax1313@yandex.ru.

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