



УДК 669.054.82 :669.714.82

TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE PROCESSING OF ALUMINUM SLAG

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВОГО ШЛАКА

Verhovlyuk A.M. / Верховлюк А.М.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.**National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev**Національна академія наук України***Dovbenko V.V. / Довбенко В.В.***Директор ООО «ПП «Укркабель», Киев, Україна**Director LLC «PE «Ukr cable», Kiev, Ukraine***Chervonyi I. F. / Червоный И.Ф.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

Аннотация. Представлен способ переработки алюминиевого шлака в электротермической установке, заключающийся в подаче шлака на поверхность алюминиевого расплава и оплавление шлака электрической дугой. Электротермическая установка для его переработки состоит из плавильной накопительной печи и расположенной над ней электродуговой вакуумной камерой, снабжённой дозатором шлаковой смеси.

Ключевые слова: алюминий, вторичный алюминий, сплав, сырьё, шлак, пенки, дресссы, расплав, электротермическая установка, плавильная печь, накопительная печь, вакуумная камера.

Вступление.

В настоящее время промышленное производство алюминия значительно выросло и мировой объём производства в 2018 г. составил 64,3 млн. т. [1]. При этом прогнозируется увеличение объёма производства до 80 млн. т., рис. 1 [2]. На Украине ежегодно производится 210 тыс. тонн алюминия. Около 100 тыс. тонн производится методом вторичного переплава алюминиевого лома [3].

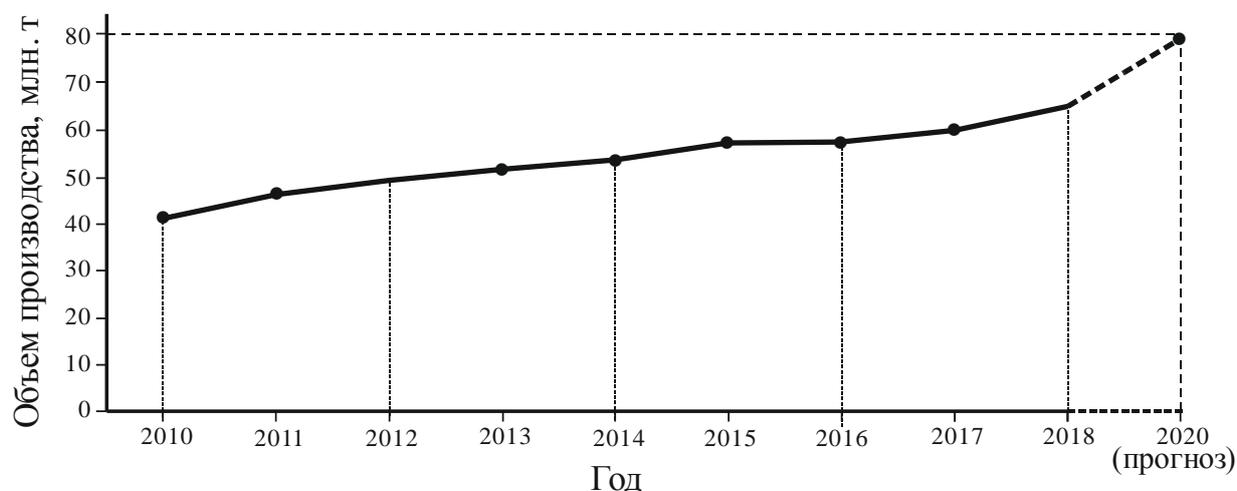


Рис. 1. Мировой объём производства алюминия [1, 2]

Возрастающий спрос на алюминий и его сплавы, обуславливает поиск путей восполнения его запасов путём более эффективного и экономичного



извлечения алюминия, как из бедных шлаков, так и путём переработки алюминиевого сырья с высоким отношением площади поверхности к весу. Например, при обработке деталей образуется стружка, вес которой составляет от 3 до 10 % от общей массы обрабатываемых деталей. Стружка, имеет небольшую плотность по сравнению с расплавленным металлом, и это обстоятельство затрудняет её переплавку по причине быстрого окисления стружки при контакте с горячим воздухом.

В соответствии с аналитическим обзором мирового производства и потребления алюминия, в настоящее время объём производства вторичного алюминия составляет примерно 30 % от общего мирового производства алюминия, и доля вторичного алюминия продолжает увеличиваться [4, 5].

Также требуют глубокой переработки алюминиевые шлаки в виде так называемых съёмов накапливающиеся при первичном получении алюминия. Съёмы, кроме металлического алюминия и его оксида, содержат различные продукты сгорания и отслоившиеся остатки огнеупорной футеровки печи. В зависимости от содержания в них доли алюминия съёмы классифицируют как пенки - содержание алюминия $>45\%$ или как дроссы - содержание алюминия $<45\%$. Согласно данным работы [6], содержание алюминия в шлаках может достигать 60 % от количества шлака после процесса рафинирования. Такой шлак является дополнительным источником поступления алюминия при переработке вторичного алюминия.

Основной текст.

Краткий обзор технологий переработки шлаков. Отдельная группа алюминиевых шлаков образуется при вторичном производстве алюминия из алюминиевого скрапа, а именно, в данном случае ещё в большем объёме. Поскольку в рамках процессов, используемых для извлечения вторичного алюминия, добавляются соляные смеси, состоящие из NaCl и KCl, происходит образование так называемых алюминиевых соляных шлаков, в которых также содержатся регенерируемые доли алюминия. Однако, даже, сами алюминиевые соляные шлаки при сливании сжиженного сырого сплава склонны к образованию непосредственной реакции с окружающей атмосферой, в результате чего, с одной стороны, затрудняется регенерация доли алюминия из алюминиевых соляных шлаков, а с другой стороны, рабочая атмосфера в зоне плавильных печей насыщается вредными газами.

Значительный объём алюминиевых шлаков образуется на литейных предприятиях, работающих по технологии бесфлюсовой плавки алюминиевых сплавов. Шлаки могут содержать от 20 до 80 % металла. Фактически они представляют съёмы, которые состоят из смеси металла, и оксидов. Сюда также можно отнести настывшие с разливочных ковшей и пена, образующаяся при переливании алюминия.

Как показано выше, лёгкий алюминиевый лом трудно эффективно плавить, и он очень легко окисляется. Незащищённые развитые алюминиевые поверхности быстро окисляются на воздухе даже при температуре окружающей среды. При воздействии высоких температур, процесс окисления значительно ускоряется. Поэтому, одной из наиболее распространённых технологий



переработки алюминиевых отходов является процесс, связанный с защитой алюминиевого лома от окисления, например, погружением раздробленной смеси в расплав алюминия. Способы и аппараты, реализующие данную технологию, приведены в работах [7-9]. Однако, описанные в них технологические приёмы эффективны для алюминиевых отходов, содержащих не более 7 % оксидов, например, таких как алюминиевая стружка. В случае же когда необходимо перерабатывать алюминиевые шлаки, содержащие глинозём и другие, окисные и солевые соединения использовать указанные методы становится не эффективно.

Для уменьшения затрат на переработку, предложен метод [10] прессования горячих шлаков непосредственно после забора их с зеркала плавильной печи. Согласно разработанной технологии горячий шлак загружают в форму и сдавливают под прессом. Выжатый расплав алюминия стекает в изложницу и затвердевает. Для переработки полученного после сдавливания остатка в виде спрессованной корки требуются меньшие затраты. Однако, применение указанного приёма лишь частично решает проблему переработки алюминиевых шлаков и уменьшения их доли. Метод также не позволяет отделять алюминий при переработке холодных шлаков.

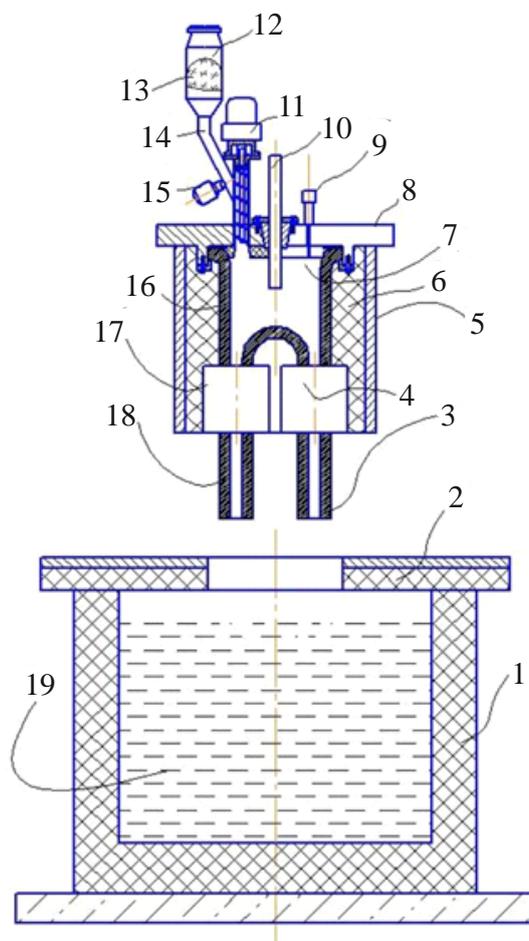
Известен также способ переработки алюминиевого шлака [11], в электрошлаковой печи постоянного тока, имеющей тигель с нижним электродом в качестве катода и верхним электродом в качестве анода. Криолит (Na_3AlF_6) и оксид алюминия (Al_2O_3) загружают в тигель электрошлаковой печи и расплавляют, затем в полученный жидкий расплав (электролит) измельчают алюминиевый шлак (механическая смесь Al_2O_3 и металлического алюминия) и криолит, добавляются порциями по мере плавления и растворения их в электролите. Извлечение жидкого металла из алюминия происходит на дне тигля, в области катода, а извлечение вторичного шлака в виде смеси криолита и глинозема происходит в области анода. Таким образом, применение электрошлаковой печи обеспечивает плавление и растворение алюминиевого шлака при температуре в диапазоне от 800 до 2000 °С.

Применение электродуговых печей для переработки алюминиевых отходов не сопряжено с использованием соединений, содержащих хлор и фтор и в этом отношении электродуговые печи, являются наиболее предпочтительными. Так, для переработки металлического лома предложен способ плавки в электродуговой печи, описанный в работе [12]. Процесс предусматривает электродуговую печь, в которой содержится, по меньшей мере, один электрод, и имеется система для выдувания газа вниз в пространство печи в окрестностях электрода. Порошок или мелко гранулированное твёрдое вещество вдувается в пространство печи вместе с газом. Кроме того, система для выдувания газа вниз снабжена специальными турбулизаторами. Их наличие по мнению авторов значительно улучшает работу печи, однако, также, как и в других известных ранее конструкциях дуговых печей, регулирование длины электрической дуги производится путём перемещения электрода с помощью привода обладающего механической инерцией. Механическая инерция отрицательно влияет на стабильность горения дуги и вызывает аномальные толчки токовой нагрузки.



Задачи исследований. Целью данной работы является разработка экономичного и технологичного способа переработки алюминиевых шлаков, улучшение экологической обстановки в процессе его извлечения и создание устройства.

Выполнение исследований. Для достижения указанной цели способ переработки алюминиевого шлака осуществляют в электротермической установке, описание устройства которой приведено ниже (рис.2).



1 - плавильная накопительная печь; 2 – теплоизолирующая крышка; 3 и 18 – огнеупорные патрубки; 4 - откачивающий линейный асинхронный статор; 5 – обечайка; 6 – огнеупорная вата; 7 – электродуговая вакуумная камера; 8 – стальная планшайба; 9 – датчик; 10 – электрод; 11 - электромеханический шнековый дозатор; 12 - герметичный бункер; 13 - шлаковая масса; 14 – трубопровод; 15 - электромагнитный клапан; 16 – керамический стакан; 17 - нагнетающий линейный асинхронный статор; 19 – расплав алюминиевого сплава;

Рис.2. Схема установки для получения алюминия из литейного шлака и отходов

Установка состоит из плавильной накопительной печи 1, в которой накапливается и усредняется расплавленный алюминиевый сплав 19. Печь закрывается теплоизолирующей крышкой 2. Над плавильной накопительной печью 1 располагают сборный реакторный блок, представляющий электродуговую вакуумную камеру 7. Блок электродуговой вакуумной камеры



7, составлен из керамического стакана 16, и стальной планшайбы 8. Стакан 16 герметично крепится к планшайбе 8 и дополнительно изолируется огнеупорной ватой 6 расположенной внутри обечайки 5. Дно керамического стакана 16 содержит встроенные огнеупорные патрубки 3 и 18, которые выполняют функции трубопроводов.

Трубопровод 18 является первым нагнетающим трубопроводом и на нём установлен нагнетающий линейный асинхронный статор 17, а трубопровод 3 является вторым откачивающим трубопроводом и на нём расположен откачивающий линейный асинхронный статор 4. В центральной части электродуговой вакуумной камеры 7 установлен электрод 10. Электропитание на электрод осуществляется от однофазного силового трансформатора, вторичная обмотка которого подсоединяется одним концом к электроду, а вторым контактирует с расплавленным алюминием 19, который накапливается в печи 1. При работе переменный ток от силового трансформатора может быть подан на электрод 10 и пропущен по трубопроводам в расплав, находящийся в печи.

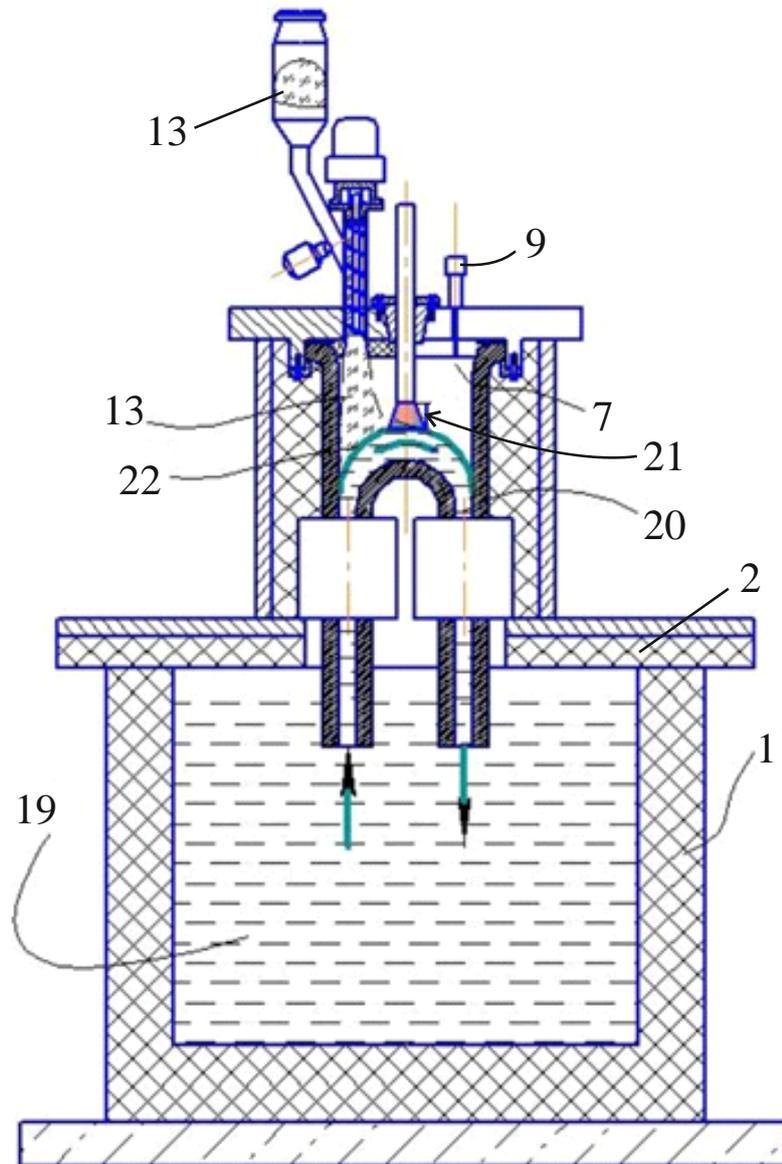
В частности, переменный ток может быть использован для резистивного нагрева потока расплава до температур, составляющих в пределах интервала от ~ 1820 до ~ 2250 °С, для способствования получению металлического алюминия.

Для подачи шлаковой массы 13 во внутреннее пространство камеры 7 на планшайбе 8 смонтирован электромеханический шнековый дозатор 11. Загрузку шлаковой массы осуществляют в герметичный бункер 12, и затем по трубопроводу 14 шлак поступает в шнековый дозатор. Сверху на планшайбе 8 установлен датчик 9 газового давления, который позволяет контролировать газовое давление внутри камеры 7. Регулирования величины газового давления внутри электродуговой камеры осуществляют с помощью электромагнитного клапана 15 связанного с цеховой системой откачки вакуума.

Процесс переработки алюминиевого шлака в электротермической установке осуществляют следующим образом.

Перед началом работы модуль электродуговой камеры 7 опускают на крышку 2, при этом концы трубопроводов погружаются в расплавленный алюминий 19, находящийся в печи 1 (рис. 3). После погружения трубопроводов в расплав включают систему откачки газа и с помощью датчика 9 контролируют величину давления внутри рабочего пространства электродуговой камеры.

В процессе снижения газового давления внутри камеры 7 расплавленный металл поднимается по трубопроводам во внутреннее пространство камеры, потоки расплава внутри камеры сливаются, и при этом формируется замкнутый гидравлический контур 20, способствующий непрерывной циркуляции расплава внутри камеры. Для соблюдения условий поддержания длины электрической дуги 21 между электродом и поверхностью расплавленного металла, в процессе всасывания расплава из печи, непрерывно управляют и поддерживают необходимую величину газового давления внутри камеры.



1 - плавильная накопительная печь; 2 – теплоизолирующая крышка; 7 – электродуговая вакуумная камера; 9 – датчик; 13 - шлаковая масса; 19 – расплав алюминиевого сплава; 20 - замкнутый гидравлический контур; 21 - электрическая дуга; 22 - поверхность алюминиевого расплава

Рис. 3. Схема, работающей установки для получения алюминия из литейного шлака и отходов

После того как расплав алюминия поднялся в камере на требуемую высоту и зафиксировано необходимое расстояние дуги 21 между концом электрода и поверхностью расплава включают нагнетающий линейный асинхронный статор 17 и одновременно откачивающий линейный асинхронный статор 4. Под действием электродинамических сил, наводимых линейными статорами в гидравлическом контуре 20 между печью и электродуговой камерой, возбуждается круговая циркуляция расплава. После возбуждения циркуляции расплава, включают электрическую дугу и на поверхность алюминиевого расплава 22 осуществляют подачу шлака 13 для его переработки. Под действием потока расплава шлак 13 перемещается в зону горения дуги.



При перемещении шлаковой массы через зону горения дуги высотой 21 достигается её прогрев с ее помощью. Кроме того, происходит непрерывное обновление шлаковой массы под электродом, где протекают основные физико-химические процессы выделения алюминия из шлака. Одним из основных процессов, способствующих выделению алюминия из шлака, является катодное распыление оксидных плёнок на поверхности шлака, развивающееся при воздействии на него электрической дуги переменного тока.

Кроме этого, в дуговом промежутке развивается процесс непосредственного восстановления металлического алюминия из его оксидов присутствующих в шлаке. Восстановленный алюминий поглощается протекающим потоком расплава. В процессе горения электрической дуги для достижения наибольшей эффективности регулируют ее длины путём изменения газового давления в электродуговой камере. При регулировании давления внутри камеры изменяется высота расположения расплава и соответственно изменяется длина дуги 21 – длина горения электрической дуги.

Помимо выгод от распределения тока при использовании процесса регулирования длины дуги путём приближения или отдаления поверхности расплава могут быть также реализованы и другие преимущества. Например, поскольку расплав способен двигаться в направлениях вверх – вниз (например, с помощью изменения газового давления внутри камеры) то вертикальное движение интенсифицирует перемешивание расплавленной ванны, содержащей шлак в зоне горения дуги.

Таким образом, высокая эффективность восстановления алюминия из шлака, а также высокая производительность процесса переработки достигается за счёт поддержания циркуляции расплавленного металла между электродуговой камерой и накопительной печью и кроме этих факторов дополнительного воздействия на шлак высоких температур в зоне горения дуги.

Конструктивные особенности установки для переработки алюминиевого шлака обеспечивают расширенные возможности для получения карбида алюминия из содержащего карбид алюминия шлака.

Установка может эксплуатироваться в пределах интервала температур от ~1910 до ~1940 °С для извлечения углерода из полученного металлического алюминия. Во время работы установки обеспечивается защита рабочего пространства в зоне работы обслуживающего персонала. В результате различные отходящие газы откачиваются вакуумным водокольцевым насосом и пропускаются через систему очистки газов.

Заключение и выводы. Были рассмотрены технологии переработки алюминиевого шлака, получаемого, как при первичной переработке алюминиевого сырья, так и при переработке вторичного алюминиевого сырья.

Показано, что высокая эффективность восстановления алюминия из шлака, а также высокая производительность процесса переработки достигается за счёт поддержания циркуляции расплавленного металла между электродуговой камерой и накопительной печью и кроме этих факторов дополнительного воздействия на шлак высоких температур в зоне горения дуги.



Литература:

1. Анализ мирового рынка алюминия: итоги 2017 года, прогнозы на 2018 год до 2021 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.talco.com.tj/sites/default/files/_world-aluminum-industry/Analyz_mirovogo_rinka_2017_prognoz_2018_do_2021.pdf. – Дата выборки 25.07.2019.
2. Чернавина, Д. А. Мировой рынок алюминия: тенденции развития, перспективы и ключевые проблемы [Текст] / Д. А. Чернавина, Е. А. Чернавин, А. В. Фаллер, М. Ю. Зданович // Молодой ученый. - 2018. - №17. - С. 206-210.
3. Савицкий, К. В. Переработка шлаков вторичного алюминия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/SND/Тeчнiк/1_savickiy%20k%20v.doc.htm. – Дата выборки 02.08.2019
4. О мировой алюминиевой промышленности на сайте РУСАЛа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iv-g.livejournal.com/930562.html>. - Дата выборки 01.08.2019.
5. Вторичное сырье цветных металлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metallurgy.zp.ua/vtorichnoe-syre-tsvetnyh-metallov/>. - Дата выборки 01.08.2019.
6. О повышении эффективности производства вторичных алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ukrbascompany.at.ua/index/o_povyshenii_ehffektivnosti_proizvodstva_vtoric_hnykh_aljuminievyykh_splavov/0-135). - Дата выборки 01.08.2019.
7. Патент WO2010/058172 World Intellectual Property Organization, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/00; F 27 В 3/00. Metal melting apparatus [Текст] / Al Chalabi, Rifat; Perry, Ophneil, Henry; заявитель и патентообладатель Al Chalabi, Rifat; Perry, Ophneil, Henry. – PCT/GB2009/002709 ; заявл. 19.11.2009 ; опубл. 20.11.2009.
8. Патент JPH03120322 Япония, МПК: С 22 В 21/00. Device for melting aluminum swarf [Текст]. – опул. 22.05.1991. 9- 21. Патент CA2977480 Канада, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/00; С 22 В 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. System and method for melting light gauge metal stock [Текст]. – опубл. 12.11.2015.
9. Патент CA2977480 Канада, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/00; С 22 В 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. System and method for melting light gauge metal stock [Текст]. – опубл. 12.11.2015.
10. Патент 5882580 USA, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/04; С 22 В 7/00. Dross presses [Текст]. – 16.03.1999.
11. Патент EP2331718, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/04; С 22 В 9/18. Electroslag melting method for reprocessing of aluminium slag [Текст]. – опубл. 22.04.2015.
12. Патент DE19517151 Германия, МПК: С 21 С 5/46; С 21 С 5/52; F 27 В 3/08; F 27 В 3/22; F 27 D 13/00; F 27 D 99/00. Melting metal scrap in electric arc furnace of good operational effectiveness and durability [Текст]. – опубл. – 07.03.1996.

**References:**

1. Analiz mirovogo rynka alyuminiya: itogi 2017 goda, prognozy na 2018 god do 2021 goda [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.talco.com.tj/sites/default/files/_world-aluminum-industry/Analiz_mirovogo_rinka_2017_prognoz_2018_do_2021.pdf. – Data vyborki 25.07.2019.
2. Chernavina, D. A. Mirovoj rynek alyuminiya: tendencii razvitiya, perspektivy i klyuchevye problemy [Tekst] / D. A. Chernavina, E. A. Chernavin, A. V. Faller, M. Yu. Zdanovich // Molodoj uchenyj. - 2018. - №17. - S. 206-210.
3. Savickij, K. V. Pererabotka shlakov vtorichnogo alyuminiya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.rusnauka.com/SND/Tecnic/1_savickiy%20k%20v.doc.htm. – Data vyborki 02.08.2019
4. O mirovoj alyuminievoj promyshlennosti na sajte RUSALa [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://iv-g.livejournal.com/930562.html>. - Data vyborki 01.08.2019.
5. Vtorichnoe syr'e cvetnyh metallov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://metallurgy.zp.ua/vtorichnoe-syre-tsvetnyh-metallov/>. - Data vyborki 01.08.2019.
6. O povyshenii effektivnosti proizvodstva vtorichnyh alyuminievyh splavov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://ukrbascompany.at.ua/index/o_povyshenii_ehffektivnosti_proizvodstva_vtorichnykh_aljuminievykh_splavov/0-135). - Data vyborki 01.08.2019.
7. Patent WO2010/058172 World Intellectual Property Organization, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/00; F 27 B 3/00. Metal melting apparatus [Tekst] / Al Chalabi, Rifat; Perry, Ophneil, Henry; zayavitel' i patentoobladatel' Al Chalabi, Rifat; Perry, Ophneil, Henry. – PCT/GB2009/002709 ; zayavl. 19.11.2009 ; opubl. 20.11.2009.
8. Patent JPH03120322 Yaponiya, MPK: C 22 B 21/00. Device for melting aluminum swarf [Tekst]. – opul. 22.05.1991. 9- 21. Patent CA2977480 Kanada, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/00; C 22 B 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. System and method for melting light gauge metal stock [Tekst]. – opubl. 12.11.2015.
9. Patent CA2977480 Kanada, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/00; C 22 B 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. System and method for melting light gauge metal stock [Tekst]. – opubl. 12.11.2015.
10. Patent 5882580 USA, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/04; C 22 B 7/00. Dross presses [Tekst]. – 16.03.1999.
11. Patent EP2331718, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/04; C 22 B 9/18. Electroslag melting method for reprocessing of aluminium slag [Tekst]. – opubl. 22.04.2015.
12. Patent DE19517151 Germaniya, MPK: C 21 C 5/46; C 21 C 5/52; F 27 B 3/08; F 27 B 3/22; F 27 D 13/00; F 27 D 99/00. Melting metal scrap in electric arc furnace of good operational effectiveness and durability [Tekst]. – opubl. – 07.03.1996.

Abstract. *A method for processing aluminum slag in an electrothermal installation is presented, which consists in feeding slag to the surface of an aluminum melt and melting the slag with an electric arc. The electrothermal installation for its processing consists of a melting storage furnace and an electric arc vacuum chamber located above it, equipped with a slag mixture dispenser. The increasing demand for aluminum and its alloys leads to a search for ways to replenish its reserves by more efficient and economical extraction of aluminum, both from poor slags and by processing aluminum raw materials with a high surface area to weight ratio. For example, when processing parts, chips are formed, the weight of which is from 3 to 10% of the total mass of the processed parts. To reduce processing costs, a method was proposed for pressing hot slags directly after taking them from the mirror of the smelting furnace. According to the developed technology, hot slag is loaded into a mold and squeezed under a press. The squeezed aluminum melt flows into the mold and hardens. For processing the residue obtained after compression in the form of a compressed crust, lower costs are required. However, the use of this technique only partially solves the problem of processing aluminum slags and reducing their share. The method*



also does not allow to separate aluminum during the processing of cold slag. In the process of reducing gas pressure inside the chamber, the molten metal rises through pipelines into the inner space of the chamber, the melt flows inside the chamber merge, and this forms a closed hydraulic circuit, contributing to the continuous circulation of the melt inside the chamber. To comply with the conditions for maintaining the length of the electric arc between the electrode and the surface of the molten metal, in the process of suction of the melt from the furnace, the necessary gas pressure inside the chamber is continuously controlled and maintained. The installation can be operated within the temperature range from ~ 1910 to ~ 1940°C to extract carbon from the obtained aluminum metal. During operation of the installation, protection of the working space in the work area of the maintenance personnel is ensured. As a result, various exhaust gases are pumped out by a vacuum ring pump and passed through a gas purification system. Thus, the high efficiency of the reduction of aluminum from slag, as well as the high productivity of the processing process, is achieved by maintaining the circulation of molten metal between the electric arc chamber and the storage furnace, and in addition to these factors, additional effects on the slag of high temperatures in the arc burning zone.

Key words: aluminum, secondary aluminum, alloy, raw materials, slag, foams, dross, melt, electrothermal installation, melting furnace, storage furnace, vacuum chamber.

Научный руководитель: д.т.н., проф. Верховлюк А.М.