А. М. Верховлюк, д-р техн. наук, проф., зав. відділу;

e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com

В. В. Довбенко*, асп., ген. дир.; e-mail: dovbenko@ukr.net

П. В. Русаков, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: petrovlad2212@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ТОВ «ВП «Укркабель» (Коцюбинське, Україна)

ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНА УСТАНОВКА ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ АЛЮМІНІЄВОГО ВИРОБНИЦТВА

В статі представлено схему та роботу електротермічної установки, в якій передбачено подачу шлаку на поверхню алюмінієвого розплаву і його оплавлення електричною дугою. При цьому оплавлення алюмінієвого шлаку проводиться в електродуговій камері, в яку всмоктують алюмінієвий розплав з накопичувальної печі, при чому рівень розплаву в електродуговій камері піднімають на задану відстань від електроду. В процесі горіння електричної дуги регулюється її довжина шляхом зміни газового тиску в електродуговій камері. Оплавлення алюмінієвого шлаку проводиться в процесі підтримки циркуляції розплавленого металу між електродуговою камерою і накопичувальною піччю. Циркуляція розплаву підтримується за допомогою електродинамічної сили, що генерується лінійними асинхронними статорами, встановленими на трубопроводах, які з'єднують тигель з накопичувальною піччю. Електротермічна установка для переробки алюмінієвого шлаку складається з плавильної накопичувальної печі і розташованої над нею електродугової вакуумної камери з вмонтованим дозатором шлакової суміші. Між плавильною накопичувальною піччю і електродуговою вакуумною камерою встановлені перший нагнітаючий і другий відкачуючий трубопроводи, які разом з камерою і піччю утворюють замкнутий гідравлічний контур, в якому на першому трубопроводі встановлено нагнітаючий лінійний асинхронний статор, а вздовж другого трубопроводу встановлено лінійний асинхронний статор для відкачування розплаву з камери в піч. Висока ефективність відновлення алюмінію з шлаку, а також висока продуктивність процесу переробки досягається за рахунок підтримки циркуляції розплавленого металу між вакуумною електродуговою камерою і накопичувальною піччю й окрім цього, діє додатковий вплив високих температур в зоні горіння дуги на шлак.

Ключові слова: електротермічна установка, алюміній, ливарний алюмінієвий шлак, плавка.

Всезростаючий попит на алюміній і його сплави обумовлює пошук шляхів поповнення його запасів шляхом більш ефективного та економічного вилучення алюмінію як з бідних шлаків, так і шляхом переробки алюмінієвої сировини з високим співвідношенням площі поверхні до маси. Наприклад, при механічній обробці деталей утворюється стружка, вага якої коливається від 3 до 10 % загальної маси оброблюваних деталей. Стружка, має невелику щільність в порівнянні з розплавленим металом, і ця обставина ускладнює її переплавку через швидке окислення стружки при контакті з гарячим повітрям.

Також глибоку переробку потребують алюмінієві шлаки у вигляді так званих з'ємів, що накопичуються в процесах первинного одержання алюмінію. З'єми, крім металевого алюмінію і його оксиду, містять різні продукти згоряння, що відшаровуються із залишками вогнетривкої футеровки печі.

Залежно від вмісту в них частки алюмінію, їх класифікують як піни: вміст алюмінію > 45 %; або як дрос: вміст алюмінію < 45 %.

Ще одна група алюмінієвих шлаків утворюється при вторинному виробництві алюмінію – з алюмінієвого скрапу, а саме, в даному випадку, в ще у більшому обсязі.

Оскільки під час процесів, що використовують для отримання вторинного алюмінію, додають соляні суміші, які складаються з NaCl і KCl , відбувається утворення так званих алюмінієвих соляних шлаків, в яких також містяться регеновані частки алюмінію. Однак, навіть самі алюмінієві соляні шлаки при зливанні схильні до утворення безпосередньої реакції з навколишньою атмосферою, в результаті чого, з одного боку, не відбувається регенерація частки алюмінію з алюмінієвих соляних шлаків, а з іншого боку, робоча атмосфера в зоні плавильних печей насичується шкідливими газами.

Значна кількість алюмінієвих шлаків утворюється на ливарних підприємствах, що працюють за технологією безфлюсової плавки алюмінієвих сплавів. Вказані шлаки можуть включати від 20 до 80 % металу. Фактично вони представляють з'єми, які складаються з суміші металу, і оксидів. Сюди також можна віднести настили з розливних ковшів і піну, що утворюється при переливанні алюмінію.

Легкий алюмінієвий брухт важко ефективно плавити, і він дуже легко окислюється. Незахищені розвинені алюмінієві поверхні швидко окислюються на повітрі навіть при температурі навколишнього середовища. При впливі високих температур, процес окислення значно прискорюється. Також інтенсивність окислення залежить від вологості середовища, температури та від вмісту домішок. Оксид алюмінію – дуже стійка хімічна сполука з низькою пружністю дисоціації пари, яка при температурі 750°C складає 10^{-40} Па. Теплота утворення Al_2O_3 за реакцією $2\text{Al}_{\text{тв}} + 3/2\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3$ дорівнює 1680 кДж/моль. Він не відновлюється і не розчиняється в рідкому алюмінії, але при плавці подрібнюється та рівномірно розподіляється в об'ємі рідкого металу. Тверді включення оксиду в алюмінії від'ємно впливають на його фізичні, механічні та технологічні властивості. Тому, однією з найбільш поширених технологій переробки алюмінієвих відходів є процес, пов'язаний із захистом алюмінієвого брухту від окислення, наприклад, зануренням роздробленої суміші в розплав алюмінію. Способи та установки, що реалізують цю технологію переробки алюмінієвих відходів представлено в роботах [1–9].

Для зменшення витрат на переробку алюмінієвих шлаків запропоновано метод пресування їх в гарячому стані безпосередньо після забору з дзеркала плавильної печі [10]. Згідно з розробленою технологією гарячий шлак завантажують в форму і здавлюють під пресом. Вичавлений розплав алюмінію стікає в металеву форму і твердне. Для переробки отриманого після здавлювання залишку у вигляді спресованої кірки потрібні менші витрати. Однак, застосування даного прийому лише частково вирішує проблему переробки алюмінієвих шлаків і зменшення їх частки. Метод також не дозволяє відокремлювати алюміній при переробці холодних шлаків.

Для плавки алюмінієвого лому, шлаку та відходів різного виробництва використовують печі різних конструкцій. Кожна з них в тій чи іншій мірі придатна для плавки визначеного виду сировини. Це пов'язано, в основному, з вмістом домішок, а також зі зниженням вигорання та механізацією основних технологічних операцій.

Найчастіше використовують універсальні полум'яні відбивні печі. В них можна плавити практично любую сировину. Їх може бути декілька модифікацій: одно-, дво-, трикамерні. Частіше всього в промисловості використовують двокамерні печі.

Для плавки дрібної шихти, а саме стружки, шлаку та ін. представляють інтерес обертові короткобарабанні печі. Це сталений футерований барабан, який встановлено на опорних роликах. Швидкість обертання барабана регулюється в межах від одного до вісьми об/хв. Футерівка набивна або викладена спеціальною фасонною цеглою. Піч нагрівається за допомогою природного газу або мазуту.

Часто алюмінієвий шлак переробляють в електрошлаковій печі постійного струму, що має тигель з нижнім електродом в якості катода і верхнім електродом в якості анода [11]. Кріоліт (Na_3AlF_6) і оксид алюмінію завантажують в тигель і розплавляють, потім в отриманий рідкий розплав (електроліт) додають подрібнений алюмінієвий шлак (механічна суміш Al_2O_3 і металевого алюмінію), а кріоліт додається порціями в

міру плавлення і розчинення їх в електроліті. Відбір рідкого металу відбувається на дні тигля, в області катода, а відбір вторинного шлаку у вигляді суміші кріоліту і глинозему відбувається в області анода. Отже, застосування електрошлакової печі забезпечує плавлення і розчинення алюмінієвого шлаку при температурі в діапазоні від 800 до 2000 °С. Однак, істотними недоліками такого типу печей є їх низька продуктивність переплавки, підвищені витрати і значні проблеми, пов'язані із забрудненням повітря газами, що утворюються при плавленні кріоліту.

Застосування електродугових печей для переробки алюмінієвих відходів не пов'язане з використанням хімічних сполук, що містять хлор і фтор. Враховуючи цей фактор, електродугові печі є найбільш підходящими [12, 13]. Процес передбачає електродугову піч, в якій міститься, щонайменше, один електрод, і є система для видування газу вниз, в простір печі, по краям електрода. Порошок або дрібно гранульована тверда речовина вдувається в простір печі разом з газом. Крім того система для видування газу вниз забезпечується спеціальними турбулізаторами. Наявність турбулізаторів, на думку авторів, значно покращує роботу печі, однак, також як і в інших, відомих раніше, конструкціях дугових печей. В даному випадку регулювання довжини електричної дуги проводять шляхом переміщення електрода за допомогою складного приводу, що має механічну інерцію. Механічна інерція негативно впливає на стабільність горіння дуги і викликає аномальні поштовхи струмового навантаження. Даний спосіб плавки більш ефективний для залізовуглецевих сплавів, тому що при переплавці алюмінієвих шлаків утворюється значний угар.

Метою даної роботи було розроблення економічного способу переробки алюмінієвих шлаків для одержання алюмінію та створення устаткування, яке може забезпечити високу ефективність і мати розширені функціональні можливості, що важливо задля поліпшення екологічної обстановки при їх переробці.

Технічним результатом є спрощення процесу переробки алюмінієвого шлаку, зниження енерговитрат на його переробку, та забезпечення захисту навколишнього середовища в місцях переробки алюмінієвих відходів.

В даному випадку переробку алюмінієвого шлаку проводили в електротермічній установці, в якій передбачено подачу шлаку на поверхню алюмінієвого розплаву і його оплавлення електричною дугою (рис. 1, 2). При цьому оплавлення алюмінієвого шлаку проводили в електродуговій камері, в яку всмоктують алюмінієвий розплав з накопичувальної печі, причому рівень розплаву в електродуговій камері піднімали на задану відстань від електрода. В процесі горіння електричної дуги регулювали її довжину шляхом зміни газового тиску в електродуговій камері. Оплавлення алюмінієвого шлаку проводили в процесі підтримки циркуляції розплавленого металу між електродуговою камерою і накопичувальною піччю. Циркуляцію розплаву підтримували під дією електродинамічної сили, що генерується лінійними асинхронними статорами, встановленими на трубопроводах, які з'єднують тигель з накопичувальною піччю. Електротермічна установка для переробки алюмінієвого шлаку складається з плавильної накопичувальної печі і розташованої над нею електродугової вакуумної камери з вмонтованим дозатором шлакової суміші. Між плавильною накопичувальною піччю і електродуговою вакуумною камерою встановлено перший нагнітаючий і другий відкачуючий трубопроводи, які разом з камерою і піччю утворюють замкнутий гідравлічний контур, в якому на першому трубопроводі встановлено нагнітаючий лінійний асинхронний статор, а вздовж другого трубопроводу встановлено лінійний асинхронний статор для відкачки розплаву з камери в піч.

Установка складається з плавильної накопичувальної печі 1, в якій збирається і усереднюється розплавлений алюмінієвий сплав (Al). Піч закривається теплоізоляційною кришкою 101. Над плавильною накопичувальною піччю 1 розташовують збірний реакторний блок, який представляє електродугову вакуумну камеру 2. Блок електродугової вакуумної камери 2 складається з керамічного стакана 3 сталевий планшайби 4. Стакан 3 герметично кріплять до планшайби 4 і додатково ізолюють вогнетривкою ватою 102, яку вкрито всередину обичайки 103. Дно

Рис. 1. Загальний вигляд установки для переплаву алюмінієвого шлаку

керамічного стакана 3 містить вбудовані вогнетривкі патрубки 5 і 6, які виконують функції трубопроводів. Трубопровід 5 є першим нагнітаючим трубопроводом і на ньому встановлено нагнітаючий лінійний асинхронний статор 8, а трубопровід 6 є другим, яким відкачують повітря і на ньому розташовано відкачуючий лінійний асинхронний статор 9. У центральній частині електродугової вакуумної камери 2 встановлено електрод 10. Електроживлення на електрод здійснюється від однофазного силового трансформатора, вторинна обмотка якого приєднується одним кінцем до електрода, а другим (не показано) контактує з розплавленим алюмінієм, який наколюється в печі 1. При роботі змінний струм від силового трансформатора може подаватися на електрод 10 і пропускатися по трубопроводах в розплав, що знаходиться в печі.

Рис. 2. Загальний вигляд електротермічної установки в робочому стані в процесі переробки алюмінієвого шлаку

Зокрема, змінний струм можна використовувати для резистивного нагрівання потоку розплаву до температур, що становлять в межах інтервалу від 1800 до 2250 °С, для сприяння отримання металевого алюмінію.

Для подачі шлакової маси 11 у внутрішній простір камери 2 на планшайбі 4 змонтовано електромеханічний шнековий дозатор 12. Завантаження шлакової маси здійснюють в герметичний бункер 13, і потім по трубопроводу 14 шлак надходить в шнековий дозатор. Зверху на планшайбі 4 встановлено датчик 15 газового тиску, який дозволяє контролювати газовий тиск всередині камери 2. Регулювання газового тиску всередині електродугової камери здійснюють за допомогою електромагнітного клапана 16, зв'язаного з цеховою системою відкачування вакууму.

Процес переробки алюмінієвого шлаку в електротермічній установці здійснюють наступним чином. Перед початком роботи модуль електродугової камери 2 опускають на кришку 101, при цьому кінці трубопроводів занурюють в розплавлений алюміній, що знаходиться в печі 1 (рис. 2). Після занурення трубопроводів в розплав включають систему відкачування газу і за допомогою датчика 15 контролюють тиск всередині робочого простору електродугової камери. В процесі зниження газового

тиску всередині камери 2 розплавлений метал піднімається по трубопроводах у внутрішній простір камери, потоки розплаву всередині камери зливаються, і при цьому формується замкнутий гідравлічний контур 7, який забезпечує безперервну циркуляцію розплаву всередині камери. Для дотримання умов підтримки необхідної довжини електричної дуги H між електродом і поверхнею розплавленого металу, в процесі всмоктування розплаву з печі безперервно управляють і підтримують необхідний рівень газового тиску всередині камери.

Після того як розплав алюмінію піднявся в камері на необхідну висоту і зафіксовано необхідну відстань H між кінцем електрода і поверхнею розплаву включають нагнітаючий лінійний асинхронний статор 8 і одночасно з ним відкачуючий лінійний асинхронний статор 9. Під дією електродинамічних сил, що наводяться лінійними статорами в гідравлічному контурі 7 між піччю і електродуговою камерою збуджується контурна циркуляція розплаву. Включають електричну дугу і на поверхню алюмінієвого розплаву (ПР) здійснюють подачу шлаку 11 для його переробки. Під дією потоку розплаву шлак 11 переміщується в зону горіння дуги. При переміщенні шлакової маси через зону горіння дуги, що має висоту H , досягається її прогрів електричною дугою; крім того, відбувається безперервне оновлення шлакової маси під електродом, де протікають основні фізико-хімічні процеси виділення алюмінію з шлаку. Одним з основних процесів, що сприяють виділенню алюмінію з шлаку, є катодне розпилення окисних плівок на поверхні шлаку. Крім цього, в дуговому проміжку розвивається процес безпосереднього відновлення металевого алюмінію з його оксидів присутніх в шлаку. Відновлений алюміній абсорбується в потоці розплаву, що здійснює кругообіг в гідравлічному контурі. У процесі горіння електричної дуги для досягнення найбільшої ефективності регулюють довжину електричної дуги шляхом зміни газового тиску в електродуговій камері. При регулюванні тиску всередині камери змінюється висота поверхні розплаву і відповідно змінюється H довжина горіння електричної дуги. Крім вигод від розподілу струму при використанні процесу регулювання довжини дуги шляхом наближення або віддалення поверхні розплаву можуть бути також реалізовані й інші переваги. Наприклад, оскільки розплав здатний рухатися в напрямках вгору–вниз (наприклад, за допомогою зміни газового тиску всередині камери), то вертикальний рух інтенсифікує перемішування розплавленої ванни, що містить шлак в зоні горіння дуги.

Таким чином, висока ефективність відновлення алюмінію з шлаку, а також висока продуктивність процесу переробки досягається за рахунок підтримки циркуляції розплавленого металу між вакуумною електродуговою камерою і накопичувальною піччю і окрім цього діє додатковий вплив високих температур в зоні горіння дуги на шлак.

Конструктивні особливості установки для переробки алюмінієвого шлаку забезпечують також розширені можливості для отримання карбіду алюмінію з алюмінієвого шлаку. Також установку можна експлуатувати в межах інтервалу температур від 1910 до 1940 °C для вилучення вуглецю з отриманого металевого алюмінію.

Під час роботи установки забезпечується захист робочого простору в зоні роботи обслуговуючого персоналу. Гази, що відкачуються з камери вакуумними водокільцевими насосами пропускають через систему їх очищення. Окрім того, в реальних умовах роботи печі це приводить до зниження кількості флюсів та підвищення процесу плавлення. При цьому також зменшується кількість шкідливих відходів та витрат на підтримання роботи обладнання газоочищення.

Список літератури

1. Койбаш В. А., Резников А. А. Оборудование предприятий вторичной цветной металлургии. М.: Металлургия, 1976. 232 с.
2. Шкляр М. С. Печи вторичной цветной металлургии. М.: Металлургия, 1987. 216 с.
3. Ларионов Г. В. Вторичный алюминий. М.: Металлургия, 1967. 271 с.

4. Худяков И. Ф., Дорошкевич А. П., Кляйн С. Э., Гульдин И. Т., Фомин Б. А. Технология вторичных цветных металлов. М.: Metallurgy, 1981. 280 с.
5. Галевский Г. В., Кулагин Н. М., Минцис М. Я. Metallurgy вторичного алюминия. Новосибирск: Наука, 1998. 288 с.
6. Вторичные материальные ресурсы цветной металлургии. Лом и отходы цветных металлов. Справочник. М.: Экономика, 1984. 151 с.
7. Metal melting apparatus. Патент WO2010058172 (A1). 2010.
8. Device for melting aluminum swarf. Патент JPH03120322 (A). 1991.
9. System and method for melting light gauge metal stock. Патент CA2977480 (A1). 2015.
10. Dross presses. Патент US5882580 (A). 1999.
11. Electroslag melting method for reprocessing of aluminium slag. Патент EP2331718 (B1). 2015.
12. Melting metal scrap in electric arc furnace of good operational effectiveness and durability. Патент DE19517151 (C1). 1996.
13. Моисеев Г. К., Казанцев Г. Ф., Барбин Н. М., Бродова И. Г., Ватолин Н. А. Взаимодействие силумина с ионными расплавами галогенидов щелочных металлов. *Расплавы*, 1999, № 2. С. 35–38.

Надійшла 28.01.2021

References

1. Koibash V. A., Reznikov A. A. (1976). Equipment for secondary non-ferrous metallurgy enterprises. Moscow: Metallurgy, 232 p.
2. Shklyar M. S. (1987). Secondary nonferrous metallurgy furnaces. Moscow: Metallurgy, 216 p.
3. Larionov G. V. (1967). Secondary aluminum. Moscow: Metallurgy, 271 p.
4. Khudyakov I. F., Doroshkevich A. P., Klein S. E., Guldin I. T., Fomin B. A. (1981). Secondary non-ferrous metal technology. Moscow: Metallurgy, 280 p.
5. Galevsky G. V., Kulagin N. M., Mintsis M. Ya. (1998). Secondary aluminum metallurgy. Novosibirsk: Nauka, 288 p.
6. Secondary material resources of non-ferrous metallurgy. Scrap and waste of non-ferrous metals. Directory. M.: Economics. 1984. 151 p.
7. Metal melting apparatus. (2010). *Patent WO2010058172 (A1)*.
8. Device for melting aluminum swarf. (1991). *Patent JPH03120322 (A)*.
9. System and method for melting light gauge metal stock. (2015). *Patent CA2977480 (A1)*.
10. Dross presses. (1999). *Patent US5882580 (A)*.
11. Electroslag melting method for reprocessing of aluminum slag. (2015). *Patent EP2331718 (B1)*.
12. Melting metal scrap in electric arc furnace of good operational effectiveness and durability. (1996). *Patent DE19517151 (C1)*.
13. Moiseev G. K., Kazantsev G. F., Barbin N. M., Brodova I. G., Vatolin N. A. (1999). Interaction of silumin with ionic melts of alkali metal halides. *Rasplavy*, no. 2, pp. 35–38.

Received 28.01.2021

A. M. Verkovliuk, *Dr. Sci. (Engin.), Professor, the Head of the Department;*

e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com

V. V. Dovbenko*, *Postgraduate, General Director, e-mail: dovbenko@ukr.net*

P. V. Rusakov, *PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: petrovlad2212@gmail.com*

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Production Enterprise ukrcabel LLC (Kotsiubynske, Ukraine)

ELECTROTHERMAL INSTALLATION FOR PROCESSING OF WASTE OF ALUMINUM PRODUCTION

The article presents the scheme and operation of the electrothermal installation, which provides for the supply of slag to the surface of the aluminum melt and its melting by an electric arc. The melting of aluminum slag is carried out in an electric arc chamber, in which the aluminum melt is sucked from the storage furnace, and the level of the melt in the electric arc chamber is raised to a

given distance from the electrode. In the process of burning an electric arc, its length is regulated by changing the gas pressure in the electric arc chamber. The smelting of aluminum slag is carried out in the process of maintaining the circulation of molten metal between the electric arc chamber and the storage furnace. Melt circulation is maintained by an electrodynamic force generated by linear asynchronous stators mounted on pipelines connecting the crucible to the storage furnace. The electrothermal installation for processing of aluminum slag consists of the melting accumulative furnace and the electric arc vacuum chamber located above it with the established batcher of a slag mix. Between the melting storage furnace and the electric arc vacuum chamber are installed the first injection and second pumping pipelines, which together with the chamber and the furnace form a closed hydraulic circuit, in which the first pipeline is installed injection linear asynchronous stator from the longitudinal camera in the oven. High efficiency of aluminum recovery from slag, as well as high productivity of the processing process is achieved by maintaining the circulation of molten metal between the vacuum arc chamber and the storage furnace and in addition there is an additional effect of high temperatures in the arc combustion zone on slag.

Keywords: *electrothermal installation, aluminum, foundry aluminum slag, smelting.*