УДК 669.71 : 669.046
DOI 10.17073/0021-3438-2015-2-20-25

РЕСУРСО- И ЭКОЛОГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2015 г. **И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.В. Кухаренко**

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк

ООО «РУСАЛ ИТЦ», г. Новокузнецк

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 25.09.14 г., доработана 14.11.14 г., подписана в печать 17.11.14 г.

Рассмотрены основные направления ресурсо- и экологосберегающих технологий получения вторичных алюминиевых сплавов в современных производственных условиях. Проведен анализ видов сырья и применяемых плавильных агрегатов, показаны перспективные пути дальнейшего совершенствования данного производственного процесса. Выявлено, что традиционным промышленным способом переработки вторичного алюминиевого сырья, широко используемым на практике, является термическая обработка в среде расплавленных смесей хлоридов. Предложены бессолевые технологии переработки алюминиевых шлаков, основанные на разделении металла и оксидов путем механического воздействия на них в условиях высоких температур в среде печной атмосферы или металла-коллектора. Рассмотрены их преимущества по сравнению с широко распространенной солевой технологией: материалы, применяемые для обработки расплава, существенно дешевле хлоридов щелочных металлов; отвальные шлаки являются экологически чистыми; процесс имеет высокую производительность, так как осуществляется в одном металлургическом агрегате, что исключает необходимость проведения в нем операции чистки стенок и донной части. Показаны примеры реализации рассмотренных бессолевых технологий переработки алюминиевого сырья в условиях нескольких российских металлургических предприятий.

Ключевые слова: алюминий, шлак, технология, переработка, вторичное алюминиевое сырье, вторичные силумины, бессолевая технология.

The main directions of resource-saving and environment-saving technologies of fabrication of secondary aluminum alloys in modern industrial conditions are considered. The types of feedstocks and applied smelting aggregates are analyzed, and promising ways of the further improvement of this production process are shown. It is revealed that the traditional method of processing secondary aluminum feedstock, which is widely used in practice, is the thermal treatment in the medium of molten chloride salts. Salt-free technologies of processing aluminum dross, which are based on separation of metal and oxides by mechanical effect on them in conditions of high temperatures in the medium of the furnace atmosphere or collector metal, are proposed. Their advantages compared with a widespread salt technology are considered: materials applied to treat the melt are substantially lower-cost than alkali metal chlorides; dump slags are environmentally pure; the process has high productivity since it is performed in one metallurgical aggregate, which excludes the necessity to perform operations of cleaning the walls and bottom part in it. The examples of implementation of considered salt-free technologies of processing aluminum feedstock in conditions of several Russian metallurgical enterprises are shown.

Keywords: aluminum, slag, technology, processing, secondary aluminum feedstock, secondary silumins, salt-free technology.

Введение

В настоящее время решение вопросов экологии в металлургии вторичного алюминия следует связывать с разработкой и внедрением новых экологически безопасных технологий переработки низкосортного алюминиевого сырья, в качестве которого в основном используется алюминиевый лом и скрап

Селянин И.Ф. *– докт. техн. наук, профессор кафедры материаловедения СибГИУ (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42) Тел.: (3843) 78-43-99. E-mail: kafedra_lp@mail.ru.*

Деев В.Б. *– докт. техн. наук, гл. науч. сотр. кафедры технологии литейных процессов МИСиС (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.*

Кухаренко А.В. *– начальник отдела литья литейного центра ООО «РУСАЛ ИТЦ» (654000, г. Новокузнецк, пр. Ферросплавный, 7). E-mail: Andrey.Kukharenko@rusal.com.*

[1—6], а другие подобные отходы (съемы, шлаки и дроссы) практически не применяются [7].

К съемам относят настыли с разливочных ковшей, пену, образующуюся при переливах металла, а также оксидную пленку, снимаемую с поверхности в раздаточных печах при изготовлении литых изделий. Они, как правило, переплавляются в газовых отражательных печах литейных цехов вместе с первичным чушковым алюминием и другими отходами, такими, как литниковая система, прибыли и брак.

При обработке расплавленного металла флюсами смесь оксидов, нитридов с частичками футеровки и флюса удаляется с поверхности расплава и образует алюминиевые шлаки, которые перерабатываются на специализированных предприятиях. В работе [8] отмечается, что количество снимаемого шлака составляет до 5 % от массы приготовленного сплава.

Алюминиевые шлаки (съемы) могут быть двух видов:

— кусковатые, содержащие от 45 до 80 % Al; их подвергают дроблению на современных установках Tambler (Франция);
— порошкообразные (сухие), содержащие от 10 до 20 % Al и образующиеся при электроплавке или плавке в отражательных печах с небольшим (1—3 %) расходом флюсов.

Присутствующий в шлаках металлический алюминий встречается в виде:

— корольков металла различных размеров и форм, запутавшихся в шлаке при его удалении с поверхности расплава;
— диспергированного алюминия, являющегося результатом распада хлоридных, оксидных и фторидных субсоединений Al.

Цель работы состояла в анализе существующих перспективных технологических схем переработки низкосортного алюминиевого сырья в Российской Федерации и за рубежом.

Анализ способов переработки алюминиевого сырья

Распределение алюминия в шлаках различного фракционного состава приведено в табл. 1.

Утилизация низкосортных алюминиевых отходов, включая и солевые шлаки, была включена DOE (U.S. Department of Energy) в число приоритетных направлений совершенствования природоохранных мероприятий, выделенных еще в 2000 г. [10].

Таблица 1
Распределение алюминия в шлаках по фракциям [9]

Фракции, мм	Содержание, %	
	к общей массе металла в шлаке	к массе шлака
+5	19,1	2,89
1–5	20,4	3,08
0,5–1,0	17,0	2,57
–0,5	31,7	4,79
≥0,01	11,8	1,77
Всего	**100,0**	**15,1**

Наиболее распространенным способом промышленной переработки низкосортного алюминиевого сырья является термический, включающий нагрев до температуры плавления извлекаемого металла и последующее химическое или физическое (например, механическое) воздействие на расплав с целью разделения оксидов и хлоридов от металла.

Анализ существующих в настоящее время промышленных методов извлечения алюминия из вторичного сырья показывает, что преимущественное развитие получила так называемая солевая металлургия, предусматривающая в качестве основного процесса разделение металла и оксидов в ванне расплавленных хлоридов щелочных металлов [9, 11—13]. Основным разработчиком технологии и производителем необходимого металлургического оборудования для промышленной реализации солевого способа для России является фирма «Remetall» (г. Бильбао, Испания). Сравнительно высокие показатели по извлечению из алюминиевых шлаков, достигаемые при использовании солевого расплава, объясняются следующими факторами:

— расплавы солей характеризуются низкой вязкостью, что обеспечивает высокую скорость осаждения металлических корольков;
— низкая смачиваемость металла солями облегчает коагуляцию его мелких частиц, увеличивая степень извлечения металла из перерабатываемого алюминиевого шлака;
— солевой расплав хорошо смачивает частицы оксидов шлака, что способствует их отделению от металла.

Практический интерес представляют предло-

жения авторов [14] по подготовке алюминиевой стружки к плавке и технологическое решение его реализации. После расплавления стружки на жидкую ванну насыпается флюс (хлористый калий) в количестве 1,6—1,8 % от массы стружки, затем расплав нагревается до температуры достижения рафинирующего эффекта, характеризуемого экзотермической реакцией с образованием сухого сыпучего шлака.

В промышленной практике переработка вторичного алюминиевого сырья осуществляется в условиях специализированных предприятий с получением вторичного сплава, близкого по химическому составу к марочным [15—18], за исключением высокого содержания в них железа (более 2 %, по данным [19]). При использовании рассматриваемой технологии применяются специальные солевые или пламенные отражательные печи. В последнее время для ускорения процесса переработки сырья рекомендуются вращающиеся роторные агрегаты [20, 21], которые в отличие от стационарных плавильных печей позволяют улучшить прогрев переплавляемого материала и снизить угар металла, поскольку загружаемая шихта «уходит» под зеркало расплава солей. Кроме того, при вращении печи происходит перемешивание расплава, что ускоряет процесс коагуляции металлических частиц.

Промышленное применение солевой технологии переработки вторичного алюминиевого сырья в России (предприятия в гг. Мценск, Подольск и др.) в достаточно полной мере выявило ряд крупных недостатков. Основным из них является получение отвального солевого шлака, содержащего до 75 % хлоридов щелочных металлов, что требует соблюдения особых мер по его хранению или специального передела по извлечению хлоридов [22].

В развитие этого метода в Германии [23, 24] была разработана технология обработки солевых шлаков, включающая следующие стадии:

— дробление, грохочение и отделение металлического алюминия;
— растворение и дегазация;
— отвод вредных газов;
— сгущение суспензии, фильтрация и получение глинозема;
— кристаллизация, центрифугирование и получение вторичной соли.

В 1986 г. в г. Люнен (Германия) начал работать завод производительностью 60 тыс. т/год, где солевая технология была внедрена [24].

Бессолевая технология переработки алюминиевого сырья

Так как в России отсутствует промышленный опыт переработки солевых шлаков, дальнейшее использование солевой технологии переработки вторичного алюминиевого сырья приводит к растущему ухудшению экологической обстановки в соответствующих промышленных зонах. При этом широко применяемый в мировой практике прием захоронения токсичных шлаков не решает проблему утилизации солевых шлаков [25].

Учитывая вышеизложенное, разработка бессолевого метода переработки низкосортного алюминиевого сырья является актуальной задачей. Одним из перспективных направлений ее решения является применение технологий, исключающих использование хлоридных солей [26—30].

В настоящее время успешно реализован способ [27], согласно которому горячие шлаки подвергаются прессованию в вертикальном прессе фирмы «ALTEK» (США). Данная технология имеет следующие преимущества: быстрое охлаждение шлака, высокое извлечение металла, относительно низкие эксплуатационные затраты.

Авторы [28] предлагают нагревать шлак до температуры плавления извлекаемого металла и продувать газом, выбранным из группы, содержащей воздух, нейтральный или восстановительный по отношению к извлекаемому металлу газ. При этом отделение металла от шлака осуществляется фильтрацией через пористые ткани или перфорированные огнеупорные материалы либо металлические сетки.

В работе [30] проводились эксперименты по созданию технологии переработки алюминиевых отходов в горячем состоянии без помощи солей. Технологическая схема процесса включала разогрев материала выше температуры плавления основы сплава, «выкручивание» отходов до сухих шлаков и отделение последних от металлического расплава с применением погружной центрифуги. При этом было установлено, что степень извлечения металлической составляющей шлаков с использованием в качестве коллектора расплава алюминиевого сплава близкого состава находится в прямой зависимости от количества коллектора. Оптимальным является соотношение металла-коллектора и шлака в пределах 4,5÷5,5 : 1,0.

В рамках концепции бессолевой переработки низкосортного алюминиевого сырья авторами ра-

бот [31—33] была разработана принципиально новая технология, предусматривающая использование расплавленного алюминия в качестве извлекающей фазы. Ее суть состоит в создании условий, обеспечивающих процесс коагуляции оксидных частиц, которые могут быть реализованы в следующих вариантах:

1) воздействие на расплав присадками, содержащими оксид кальция;

2) обработка расплава вторичным алюминиевым шлаком.

Промышленное опробование метода переработки шлака производства силуминов Новокузнецкого алюминиевого завода (НКАЗ, с 2000 г. — ОАО «РУСАЛ-Новокузнецк»), содержащего 60 мас.% Al, по варианту 2 проводили в условиях Кузнецкого машиностроительного завода (г. Новокузнецк) в индукционной печи ИСТ-0,4 в непрерывном режиме. В ванну расплавленного алюминия (60 кг металла) ввели 24 кг шлака НКАЗ, т.е. отношение шлак:металл составило Ш : М = 0,4. После нагрева расплава до 850 °С добавили присадку в количестве 0,5 % от массы расплава и выдержали в течение 10 мин. Затем расплав перемешали, сняли вторичный сыпучий шлак и ввели еще 12 кг шлака НКАЗ, при этом Ш : М = 0,8. В следующих циклах переработки вводили такое количество алюминиевого шлака, чтобы отношение Ш : М составляло 1,0, 1,2, 1,4, 1,6 и 1,8. По мере накопления в печи металла его сливали, оставляя «болото» на $^1/_2$ объема печи.

На каждом этапе переработки шлака отбирали пробы металла на спектральный анализ, который выполняли в физической лаборатории НКАЗ. Всего было переработано 108 кг шлака и получено 116 кг силумина, т.е. технологический (металлургический) выход годного металла составил 69 %. Усредненный по составу вторичный шлак содержал, мас.%: 91 Al_2O_3, 2,3 SiO_2, 1,3 Fe_2O_3, 0,6 CaO, 0,9 MgO и менее 0,01 хлоридов щелочных металлов. Состав сплавов, получаемых в каждом цикле, приведен в табл. 2.

Из представленных данных следует, что содержание кремния в сплавах монотонно повышается с 3,717 до 8,703 мас.%, при этом конечный материал по составу соответствует доэвтектическому силумину. Необходимо отметить и возрастание в них концентрации железа с 0,739 до 1,032 мас.%, что не превышает допустимые пределы.

На Мценском заводе алюминиевого литья (АМО ЗИЛ) были проведены две плавки по переработке съемов собственного производства также по варианту 2. В ходе первой опытной плавки в индукционной печи ИАТ-1М за 1 цикл было переработано 700 кг съемов из раздаточных печей, при этом съем сухого шлака составил 72 кг. Полученный сплав содержал, мас.%: 9,44 Si, 0,69 Fe, 1,17 Cu, 0,27 Mn, 0,53 Ni, < 0,2 Zn и остальное — Al, что соответствует составу силумина марки АК9М2 (ГОСТ РФ 1583-93), и без дополнительной корректировки состава он был направлен в производство.

Вторая опытная плавка являлась балансовой и проводилась следующим образом. В печи ИАТ-1М расплавили 280 кг чушкового сплава АК9М, затем в полученное «болото» загрузили 555 кг съемов из раздаточных печей. Полученный расплав нагрели до температуры 800 °С и ввели 4 кг присадки. После выдержки расплава в течение 20 мин печь выключили и расплав перемешали. В ходе балансовой плавки было получено 705 кг вторичного силумина и 130 кг

Таблица 2

Состав вторичных силуминов на каждом цикле переработки шлаков литейного производства НКАЗ

№ цикла	Отношение шлак:металл	Содержание элементов, мас.%						
		Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Sn	Al
1	0,4	3,717	0,739	0,031	0,028	0,024	0,002	ост.
2	0,6	4,661	0,812	0,029	0,032	0,025	0,004	ост.
3	0,8	5,426	0,870	0,028	0,034	0,025	0,003	ост.
4	1,0	5,987	0,868	0,026	0,028	0,025	0,003	ост.
5	1,2	6,937	1,001	0,050	0,029	0,035	0,003	ост.
6	1,4	7,449	0,987	0,044	0,026	0,031	0,003	ост.
7	1,6	8,377	1,045	0,040	0,027	0,030	0,004	ост.
8	1,8	8,703	1,032	0,035	0,025	0,027	0,003	ост.

Таблица 3
Технологический выход годного при использовании бессолевой технологии переработки вторичного алюминиевого сырья

Условия производства	Плавильный агрегат	ТВГ, %
НКАЗ	ИСТ-0,4	69
АМО ЗИЛ	ИАТ-1М	84
Подольский завод цветных металлов	ИАТ-6	80
	Пламенная отражательная печь (15 т)	58
Саяногорский алюминиевый завод	ИЧТ-6	74

отвального шлака. Химический состав сплава соответствовал требованиям ГОСТ РФ 1583-93. Технологический выход годного металла составил 84 %.

Данная технология была также опробована на различных металлургических предприятиях и печах: индукционных типа ИАТ-6 и пламенных отражательных (емкостью 15 т) на Подольском заводе цветных металлов, ИЧТ-6 на Саяногорском алюминиевом заводе при переработке пакетированной алюминиевой стружки. В табл. 3 приведены результаты, показывающие влияние условий производства и плавильного агрегата на технологический выход годного (ТВГ) металла при использовании бессолевой технологии переработки вторичного алюминиевого сырья. Видно, что наилучшие результаты дает плавка в индукционных печах, особенно типа ИАТ. По-видимому, это обусловлено тем, что индукционный нагрев обеспечивает наибольшую интенсификацию процесса обработки расплава в тигле печи.

Выводы

На основании выполненного анализа технологических схем переработки низкосортного алюминиевого сырья и результатов собственных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Основным промышленным способом переработки вторичного алюминиевого сырья является их термическая обработка в среде расплавленных смесей хлоридов натрия и калия.

2. Известные бессолевые технологии переработки алюминиевых шлаков предусматривают разделение металла и оксидов путем механического воздействия на них в условиях высоких температур в среде печной атмосферы или металла-коллектора.

3. Показано, что бессолевой метод переработки вторичного алюминиевого сырья имеет ряд преимуществ по сравнению с распространенной солевой технологией:

— материалы, применяемые для обработки расплава, значительно дешевле, чем хлориды щелочных металлов;
— отвальные шлаки являются экологически чистыми;
— процесс осуществляется в одном металлургическом агрегате, что обеспечивает высокую производительность;
— на футеровке печи не образуются отложения шлака, что исключает необходимость проведения операции чистки стенок и донной части агрегата.

Исследование выполнено в рамках государственной работы «Организация проведения научных исследований» государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2014—2016 гг. (задание № 2014/113).

Литература

1. *Лайнер Ю.А., Резниченко В.А., Тужилин А.С.* и др.// Технол. металлов. 2007. № 6. С. 2—11.
2. *Keverhijan V.* // J. Miner., Metal. Mater. Soc. 2002. Vol. 54, № 2. P. 38—41.
3. *Макаров Г.С.* // Технол. легких сплавов. 2004. № 1. С. 25—30.
4. Как развивать рециклинг алюминия? // Металлоснабжение и сбыт. 2004. № 4. С. 64—66.
5. *Головных Н.В., Григорьев В.Г., Черных А.А.* и др. // Тр. Междунар. конф. «Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». (г. Москва, 11—15 окт. 2004 г.). М.: РУДН, 2004. С. 170—172.
6. *Лайнер Ю.А., Мильков Г.А., Тужилин А.С.* // Тр. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и

НИОКР» (г. Екатеринбург, 15—16 июня 2011г.) . Екатеринбург: УрО РАН, 2011. Т. 2. С. 581—587.
7. *Kurchner E.* // Erzmetall. 2002. Vol. 55, № 9. P. 465—470.
8. *Шустров А.Ю., Маценко Ю.А., Нагибин В.А.* // Цв. металлы. 2004. № 1. С. 70—73.
9. *Ларионов Г.В.* Вторичный алюминий. М.: Металлургия, 1967.
10. *Altodorfer J.* / J. Miner., Metal. Mater. Soc. 2000. Vol. 52, № 11. P. 19—25.
11. *Худяков И.Ф., Дорошкевич А.П., Кляйн С.Э.* и др. Технология вторичных цветных металлов. М.: Металлургия, 1981.
12. Пат. 6379418 (США). Рециклинг алюминиевого лома (Recycle of scrap aluminum) / D. T. Ireland. Опубл. 30.04.2002.
13. Пат. 2244027 (РФ). Способ переработки лома алюминиевых сплавов, содержащих магний / Н.К. Барбин, Г.К. Моисеев, Н.А. Ватолин Н.А. и др. Опубл. 10.12.2005.
14. А.с. 1199819 (СССР). Способ подготовки стружки к плавке / С.Л. Потанин, В.И. Михайлов, В.Н. Туманов и др. 1985.
15. *Деев В.Б., Селянин И.Ф., Хосен Ри* и др. // Литейщик России. 2012. № 10. С. 14—17.
16. *Deev V.B., Degtyar V.A., Kutsenko A.I.* et al. // Steel Trans. 2007. Vol. 37, № 12. P. 991—994.
17. *Деев В.Б.* Развитие научных основ тепловых и электромагнитных воздействий на расплавы и разработка ресурсосберегающих технологий получения высококачественных отливок из алюминиевых сплавов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2012.
18. *Селянин И.Ф., Деев В.Б., Войтков А.П., Башмакова Н.В.* // Литейщик России. 2006. № 2. С. 18—20.
19. *Каленик О.Н., Немененок Б.М., Довнар Г.В., Трибушевский В.Л.* // Металлургия машиностроения. 2004. № 3. С. 23—25.
20. *Новичков С.Б.* // Цв. металлы. 2004. № 1. С. 67—69.
21. *Трибушевский В.Л., Римошевский С.Л., Иванов Д.Э., Каленик О.Н.* // Металлургия машиностроения. 2004. № 3. С. 4.
22. *Конько О.И., Курис Ю.В., Грицай В.П.* // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. 2011. № 3/11 (51). С. 11, 12.
23. *Huber J.* // Elutrotechnik (Schweiz). 1988. № 9. С. 83—85.
24. *Beckman M., Unger T.W.* // Proc. Techn. Ses. Anni. Meet. (San Diego, Calif., March 1—5). Light Metals. 1992. P. 1159—1162.
25. *Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я.* Металлургия вторичного алюминия. Новосибирск.: Наука, 1998.
26. *Федотов В.М., Лебедев В.Н., Кузнецов М.Н.* // Технология. Сер. Ресурсосберегающие процессы, оборудование, материалы. М.: ВИМИ, НИИР, 1994. Вып. 1-2. С. 39—41.
27. Пат. 2559786 (Франция). Способ извлечения жидкого алюминия при прессовании горячих шлаков (Process for recovering liquid aluminium by compressing hot dross) / Vigier Pierre, Tirilly Louis, Julliard Jacques. Опубл. 23.08.85.
28. А.с. 753919 (СССР). Способ переработки металлургических шлаков / Е.П. Капур, Л.Н. Медведева. 1980.
29. *Малиновский В.С., Малиновский В.Д., Мешков М.А., Ярных Л.В.* // Металлургия машиностроения. 2004. № 4. С. 2—7.
30. *Шустров А.Ю., Маценко Ю.А., Нагибин В.А.* // Цв. металлы. 2004. № 1. С. 70—73.
31. Пат. 2004607 (РФ). Способ переработки отходов алюминиевых сплавов / В.М. Федотов, Г.А. Червов, Н.М. Лучинин. 1993.
32. Пат. 2002831 (РФ). Способ переработки шлака производства алюминия и его сплавов / В.М. Федотов, Г.А. Червов. 1993.
33. *Федотов М.В., Селянин И.Ф., Федотов В.М.* // Литейщик России. 2007. № 8. С. 28—31.