

Наиболее рациональный режим работы соответствует плавкам № 3 и 2 (рисунки 3, 4). Расход общей энергии за период плавления шихты соответственно составил: $58,87 \cdot 10^3$ и $57,96 \cdot 10^3$ МДж; расход полезной энергии: $55,08 \cdot 10^3$ и $53,9 \cdot 10^3$ МДж; длительность периода 25 и 23 мин, а общий КПД печи – 93 %.

Причиной высокого теплового КПД печи и незначительных различий длительности периода плавления шихты и нагрева жидкого металла на данных плавках является использование рациональной средней за период подводимой мощности, равной 39 и 42 МВт.

В то же время на плавке № 1 (рисунок 2) продолжительная работа печи на 16-й ступени (пониженная ступень напряжения трансформатора) привела к снижению средней за период подводимой мощности, которая составила 32,7 мВт и к возрастанию общей тепловой энергии за период до $84,87 \cdot 10^3$ МДж. Все это, в конечном счете, привело к увеличению продолжительности периода на 12 мин и снижению теплового КПД печи до 64 %.

Таким образом, для получения теплового КПД печи 0,92–0,93 в период расплавления шихты, состоящей из брикетов массой 35 т и извести – 2,5 т, необходима средняя за период подводимая мощность не ниже 40 МВт.

УДК 669.187.28

Л.В. ТРИБУШЕВСКИЙ,
Б.М. НЕМЕНЁНОК, д-р техн. наук,
Г.А. РУМЯНЦЕВА, канд. техн. наук,
О.А. ПОЗНЯК, М.А. КУЛИК (БНТУ)

ГЛУБОКАЯ ПЕРЕРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ ШЛАКОВ – ИСТОЧНИК МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ СТАЛИ

Проблема утилизации отходов, сбережения материальных ресурсов и экологической безопасности является одной из основных для промышленности в целом и прежде всего для металлургической отрасли.

Широкое использование алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности Республики Беларусь приводит к образо-

ванию их отходов в виде стружки и шлаков. Учитывая отсутствие собственной сырьевой базы для производства первичного алюминия и сплавов на его основе, отходы алюминиевых сплавов являются потенциальным источником шихты для получения вторичного алюминия. Поэтому в последние годы вопросы вторичного использования алюминия является актуальным. По данным ОАО «Белцветмет» в общем объеме накопления вторичного алюминиевого сырья доля стружки составляет более 26 %, а шлака – более 13 %.

Рост цен на энергоносители делает простой переплав алюминиевого шлака малопривлекательным из-за низкой экономической эффективности. Поэтому для обеспечения конкурентоспособности вторичных сплавов необходима комплексная переработка отходов алюминия с применением современных и наукоемких технологий при соблюдении всех экологических требований.

Существующие технологии переплава алюминиевой стружки и шлаков, как правило, предусматривают использование значительного количества покровных флюсов при плавке, что приводит к повышению металлургического выхода металлического расплава и образованию вторичных шлаков, требующих дальнейшей переработки или захоронения.

Практика показывает, что при остаточном содержании алюминия в шлаке менее 10 % его дальнейшая переработка является нерентабельной и в большинстве случаев такой шлак подлежит захоронению как отходы 4 класса опасности с уплатой соответствующего экологического налога в размере 57,39 руб./т. Вместе с тем, такие шлаки содержат в своем составе значительное количество оксида алюминия, который может быть использован в металлургии для внепечной обработки стали.

Сотрудниками кафедры «Металлургия черных и цветных сплавов» БНТУ совместно с работниками НПФ «Металлон» разработана безотходная технология переработки алюминиевой стружки и шлаков в короткопламенной роторной печи (КПП) с получением раскислителя в виде чушки, пирамидок и гранул, а также раскислительной смеси (АРС) для внепечной обработки стали [1]. В результате проведения балансовых плавов установлено, что масса используемых продуктов плавки (расплав + шлак + пыль) составляет 99,89 % от массы загружаемой шихты, что позволяет отнести

данную технологию к категории «безотходная» [2]. На протяжении 10 лет раскислительная смесь производства НПФ «Металлон» поставлялась на Белорусский металлургический завод и металлургические комбинаты Российской Федерации. В настоящее время ее производство налажено на ОАО «Белцветмет».

Ужесточение требований к качеству стали по загрязненности ее неметаллическими включениями на ряде металлургических комбинатов Российской Федерации привело к ограничению объемов потребления АРС, но появилась потребность в разжижителях рафинировочных шлаков на основе отходов переработки вторичного алюминия (ОПВА), используемых вместо плавикового шпата. Такие препараты отличаются от АРС более высоким содержанием Al_2O_3 и ограничениями по металлическому алюминию (таблицы 1, 2) [3, 4].

Таблица 1 – Составы глиноземсодержащих материалов для разжижения шлака [3]

Материал	Массовая доля, %										
	TiO ₂	Al _{мет}	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Хлориды	Примеси
Рантал 50ГР	1,98	–	72,1	20,0	0,71	0,70	2,05	0,52	0,31	–	2,95
Брикеты ОООН «РОИС»	–	3,3	55,7	6,04	1,91	12,6	2,77	4,3	3,7	8,1	11,9

Таблица 2 – Составы разжижителей шлака, используемые в Чехии и Польше [4]

Материал	Массовая доля компонентов, %						Потеря массы при сушке, %
	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O	
АСМ 75	70–80	1–3	13–17	2–3	–	1–2	2–5
АСМ 65	60–70	6–11	3–8	2–3	–	1–2	10–12
АСМ 55	50–60	10–15	4–9	2–3	–	1–2	14–17
АСМС 65-5	60–70	5–9	3–8	2–3	4–6	2–3	7–10
АСМС 65-3	60–70	6–9	3–7	2–3	2–3	2–3	8–11
АСМС 55-5	50–60	8–13	4–9	2–3	2–3	1–2	12–15

Наиболее подходящим исходным материалом для получения разжижителя рафинировочных шлаков являются отвальные алюминиевые шлаки после длительного хранения на открытых площадках.

Такое хранение способствует частичному окислению остаточного алюминия до Al_2O_3 и вымыванию солевых составляющих флюса.

Для исследования были выбраны ОПВА, складированные на открытой площадке НПФ «Металлон» (рисунок 1, а). С целью отделения корольков алюминия ОПВА подвергали просеиванию через сито с квадратными отверстиями со стороной 5,6 мм и диагональю отверстия около 8 мм. Крупная фракция, полученная в результате рассева ОПВА, представлена на рисунке 1, б, а отсев в виде фракции менее 8 мм – на рисунке 1, в. Из полученного отсева с разных горизонтов отбирали пробы для развернутого химического анализа, который проводили в испытательном центре ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси. Результаты анализа проб отсева ОПВА НПФ «Металлон» приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты химического анализа проб отсева ОПВА с фракцией менее 8 мм

Содержание компонентов, %	Номер пробы						Среднее значение
	1	2	3	4	5	6	
Al_2O_3	81,6	78,3	81,05	80,15	81,1	80,2	80,4
CaO	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6	0,6	0,8
MgO	1,9	1,6	1,3	2,2	1,5	2,8	1,9
Fe_2O_3	5,3	5,4	6,1	5,6	6,1	6,0	5,8
SiO_2	4,4	4,6	4,6	4,0	3,4	3,6	4,1
CuO	1,7	3,0	2,5	2,7	2,3	2,7	2,5
ZnO	1,0	1,6	1,6	1,8	1,2	1,1	1,4
Na_2O	1,0	1,0	0,2	0,7	1,4	0,6	0,8
Cl	0,6	1,5	0,2	0,2	0,5	0,8	0,6
K_2O	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,3
TiO_2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3
MnO	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
NiO	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
PbO	0,1	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3
Другие	0,5	0,5	0,05	0,05	0,5	0,5	0,4
Итого примеси	18,4	21,7	18,95	19,85	18,9	19,8	19,6



a



б



в

a – ОПВА до отсева; *б* – крупная составляющая шлака после отсева;
в – просев ОПВА с фракцией 8 мм

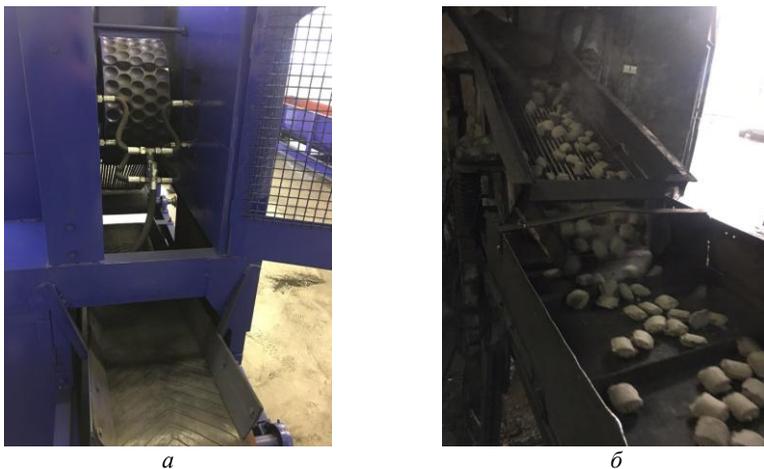
Рисунок 1 – Отсев отвалного шлака на производственной площадке
НПФ «Металлон»

Как следует из таблицы 3, отсев ОПВА содержит в качестве основного компонента оксид алюминия, незначительное количество оксидов магния, кремния.

Последующий анализ показал, что содержание фракции 0–3 мм в данном материале составляет 78–80 %. Данная фракция представляет наибольший интерес для производства высокоглиноземистых флюсов для разжижения ковшевых шлаков при производстве стали.

Для отделения корольков алюминия из отсева шлака его подвергали вихревой сепарации с использованием ленточного конвейера с многополюсным магнитным ротором. При вращении многополюсной магнитной системы в металлических частицах индуцировались вихревые токи, которые, в свою очередь, создавали магнитное поле противоположное по направлению роторной магнитной системе. В результате взаимодействия магнитных полей металлические частицы, содержащиеся в отсеве шлака, выбрасывались из движущегося потока и отделялись от неэлектропроводящей фракции.

Для производственных испытаний была изготовлена опытная партия разжижителя в виде брикетов на основе ОПВА с добавлением 40 % CaO и связующего. Брикеты получали с использованием валкового пресса (рисунок 2).



а – валковый пресс; *б* – брикеты на основе ОПВА

Рисунок 2 – Валковый пресс для получения брикетов разжижителя на основе ОПВА

Присадка брикетов на поверхность рафинировочного шлака 100-тонного сталеразливочного ковша в количестве 250 кг обеспечила заметное разжижение шлака.

Данные по химическому составу и коэффициенту распределения серы рафинировочного шлака до и после добавки разжижителя приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Химический состав рафинировочного шлака и коэффициент распределения серы (L_s)

Характеристика шлака	Химический состав шлаков (массовая доля оксидов), %					Коэффициент распределения серы (L_s)
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	
Рафинировочный (исходный)	46,5	24,4	9,8	12,6	2,6	123,4
Рафинировочный (после добавки разжижителя)	52,7	19,3	8,7	18,4	0,9	146,2

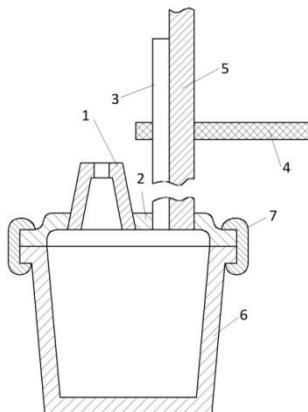
Из таблицы 4 видно, что добавки разжижителя приводят к повышению в шлаке содержания CaO и Al₂O₃, при этом заметно и снижение оксидов железа, очевидно, за счет содержания в добавляемой присадке корольков металлического алюминия. Следует отметить также рост коэффициента распределения серы от 123,4 до 146,2, что свидетельствует о лучшей десульфурующей способности шлака.

Кроме визуального контроля состояния рафинировочного шлака, оценивали его жидкоподвижность при помощи вискозиметра погружения, опускаемого в шлак на заданную глубину. Схема погруженного вискозиметра представлена на рисунке 3.

Через отверстие в тигельке диаметром 9 мм жидкий шлак попал в стакан. За характеристику вязкости шлака принимали массу шлака, затекшего в стакан за 5 с при погружении прогретого устройства в шлак на 10 с. В зависимости от массы шлака в стакане шлак классифицировали как «густой» (50–100 г), «нормальный» (15–200 г) и «жидкоподвижный» (250 г и более).

По состоянию текучести исходного рафинировочного шлака при температуре 1575 °С его можно охарактеризовать как «нормаль-

ный» (масса пробы составляла 156 г), но близкий к нижней границе данной категории. После ввода разжижителя и выдержки 10 мин масса пробы шлака в стакане составила 265 г, т.е. он перешел в категорию «жидкоподвижный».



1 – тигель с отверстием 9 мм; 2 – ограничительная планка; 3 – трубка для выхода воздуха; 4 – стакан; 5 – штанга

Рисунок 3 – Схема погружного вискозиметра

Таким образом, использование ОПВА для производства разжижителей рафинировочного шлака позволяет обеспечить необходимую жидкоподвижность рафинировочного шлака; повысить его десульфурисуемую способность за счет повышения коэффициента распределения серы; снизить экологически нагрузку на окружающую среду, исключив использование CaF_2 и захоронение отвальных алюминиевых шлаков.

Список литературы

1. **Безотходная** технология переработки алюминиевой стружки и шлаков в короткопламенной роторной печи / Л.В. Трибушевский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2017. – № 4. – С. 109–118.
2. **Трибушевский, Л.В.** Влияние технологии плавки отходов алюминия на состав и возможность использования образующейся

пыли / Л.В. Трибушевский, Б.М. Немененок, Г.А. Румянцева // Литье и металлургия. – 2018. – № 3. – С. 118–124.

3. Повышение стойкости футеровки агрегатов внепечной обработки стали / А.А. Метелкин [и др.]. – Нижний Тагил: НТИ УрФУ, 2015. – 144 с.

4. Новый продукт из отходов алюминия для внепечной обработки стали / Л.В. Трибушевский [и др.] // Металлургия: Республ. межведом. сб. научн. тр. – Минск: БНТУ, 2017. – Вып. 38. – С. 3–9.

УДК 621.74.01, 69.715, 669.74

И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук (БНТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ

Введение. Моделирование процессов затвердевания литейных сплавов, претерпевающих фазовый переход из жидкого в твердое состояние, невозможно без предварительного определения функции тепловыделения, обусловленной образованием и ростом твердой фазы в расплаве. При производстве отливок широко применяют различные способы обработки расплавов (легирование, модифицирование, рафинирование и др.), которые изменяют характер кристаллизации и теплофизические свойства литейных сплавов. В свою очередь, эти изменения оказывают существенное влияние на результаты моделирования процессов формирования отливок, зачастую оказываясь причиной неадекватных расчетов в случае использования неточных или приближенных данных о кинетике затвердевания сплавов.

Эффективным способом определения функциональных зависимостей образования и роста твердой фазы в расплаве от температуры и времени (кинетических кривых кристаллизации сплавов) является применение методов однотермопарного компьютерного термического анализа (СА-ССА-методов) [1–7]. Моделирование кинетики затвердевания и расчет содержания выделяющейся в рас-