

ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ «НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
ШКОЛА ДЛЯ МОЛОДЫХ МЕТАЛЛУРГОВ» – 2023ON THE MATERIALS OF THE INTERNATIONAL
CONFERENCE “SCIENTIFIC AND PRACTICAL
SCHOOL FOR YOUNG METALLURGISTS” – 2023

УДК 669.162.142:622.78

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-760-767



Оригинальная статья

Original article

ПОЛУЧЕНИЕ РАФИНИРОВОЧНЫХ ГЛИНОЗЕМСОДЕРЖАЩИХ ФЛЮСОВ
МЕТОДОМ СПЕКАНИЯ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯВ. В. Аксенова[✉], А. В. Павлов, Г. М. Марков

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

✉ axenovaviki@gmail.com

Аннотация. Современные сталеплавильные предприятия России для разжижения извести на агрегате ковш-печь применяют преимущественно глиноземсодержащие материалы, которые пришли взамен плавиковому шпату. Доступные сейчас на рынке глиноземсодержащие материалы не могут быть использованы напрямую в сталеплавильном производстве без предварительной подготовки (рафинирования, термообработки или брикетирования), либо просто непригодны для ковшевой обработки стали. В данной работе описаны лабораторные исследования по получению рафинировочных глиноземсодержащих флюсов методом спекания в агрегатах по типу машин для обжига окатышей или производства агломерата (в температурном интервале 1200 – 1500 °С) из чистых отходов металлургического производства (мелкодисперсная пыль производства глинозема и обожженной извести), отвечающих требованиям сталеплавильных предприятий по химическому составу и механическим свойствам. Проведено сравнение технологических схем спекания с введением в качестве источника СаО гидратированной извести и смеси гидратированной извести и карбоната кальция в соотношении 1:1. Предельно допустимое содержание СаО в спеченных брикетах при использовании в шихте смеси гидратированной извести и карбоната кальция, не приводящее к гидратационному разрушению на воздухе, находится в диапазоне 2,3 – 3,6 % в зависимости от температуры выдержки. Предельно допустимое содержание Al_2O_3 в спеченных брикетах при использовании в шихте гидратированной извести, не приводящее к гидратационному разрушению на воздухе, находится в диапазоне 9,5 – 31,7 % в зависимости от температуры выдержки. В существующих топливных агрегатах возможно получить флюсы методом спекания только при использовании в качестве источника СаО гидратированной извести, так как добавление карбоната кальция в шихту (9 – 22 %) требует увеличения температуры выдержки (выше 1500 °С) или ее продолжительности (более 25 мин).

Ключевые слова: агрегат ковш-печь, глиноземная пыль, рафинировочные флюсы, глиноземсодержащие материалы, алюминаты кальция, спекание, гидратационное разрушение

Для цитирования: Аксенова В.В., Павлов А.В., Марков Г.М. Получение рафинировочных глиноземсодержащих флюсов методом спекания из техногенного сырья. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(6):760–767. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-760-767>

PRODUCTION OF REFINING ALUMINA-CONTAINING FLUXES
BY SINTERING FROM TECHNOGENIC RAW MATERIALSV. V. Aksenova[✉], A. V. Pavlov, G. M. Markov

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

✉ axenovaviki@gmail.com

Abstract. Modern Russian steelmaking plants use predominantly alumina-containing materials for liquefying lime in a ladle-furnace unit, which replaced fluorspar. Alumina-containing materials currently available on the market cannot be used directly in steelmaking without preliminary preparation (refining, heat treatment or briquetting), or are simply unsuitable for ladle processing of steel. This work describes laboratory studies on the production of refining alumina-containing fluxes by sintering in units such as machines for pellets firing or producing agglomerate (in the temperature range of 1200 – 1500 °C) from clean metallurgical waste (fine dust from the production of alumina and burnt lime), meeting the requirements of steelmaking plants by chemical composition and mechanical properties. A comparison was made of sintering technological schemes with the introduction of hydrated lime and a mixture of hydrated lime and calcium carbonate in a 1:1 ratio as a source of CaO. We determined that the maximum permissible CaO content in sintered briquettes when using a mixture of hydrated lime and calcium carbonate in the charge, which does not lead to hydration destruction in air, is in the range of 2.3 – 3.6 %, depending on the holding temperature. The maximum permissible content of Al_2O_3 in sintered briquettes when using hydrated lime in the charge, which does not lead to hydration destruction in air, is in the range of 9.5 – 31.7 %, depending on the holding temperature. In existing fuel units it is possible to obtain fluxes by sintering only when using hydrated lime as a source of CaO, because adding calcium carbonate to the charge (9 – 22 %) requires an increase in holding temperature (above 1500 °C) or holding time (more than 25 min).

Keywords: ladle-furnace, alumina dust, refining fluxes, alumina-containing materials, calcium aluminates, sintering, hydration destruction

For citation: Aksenova V.V., Pavlov A.V., Markov G.M. Production of refining alumina containing fluxes by sintering from technogenic raw materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):760–767. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-760-767>

ВВЕДЕНИЕ

Флюсы и шлакообразующие материалы, используемые в металлургическом производстве, оказывают важное влияние на технологию производства, а также на химический состав и качество выплавляемой стали. От вида применяемых добавочных материалов напрямую зависит количество вредных примесей (сера, фосфор и газы: кислород, водород, азот), что является основополагающим моментом в получении качественной стали.

Основным шлакообразующим материалом для обработки стали на агрегате ковш-печь (АКП) является известь, имеющая температуру плавления больше 2500 °С. Для снижения температуры плавления шлака на выпуске вместе с известью вводят флюс для ее разжижения. До недавнего времени сталеплавильные предприятия для разжижения шлака на АКП широко применяли плавиковый шпат, но в настоящее время его количество минимизировали или полностью сократили по ряду негативных причин: кратковременность действия, снижение стойкости футеровки в зоне шлакового пояса, влияние на окружающую среду [1–3].

Хорошей альтернативой фторсодержащим материалам выступают глиноземсодержащие флюсы, которые по многим характеристикам превосходят плавиковый шпат. Глиноземсодержащие материалы могут применяться как самостоятельно, так и в комбинации с плавиковым шпатом даже на марках сталей, относящихся к «безалюминиевым» [4]. Большую популярность в качестве глиноземсодержащих флюсов приобрели алюмотермические шлаки производства феррованадия и алюмотермического хрома. Основным существующим недостатком таких материалов является их дефицит на рынке из-за низкого объема производства ферросплавов алюмотермическим восстановлением. Другие доступные глиноземсодержащие материалы не могут быть использованы напрямую в сталеплавильном производстве без предварительной подготовки (рафинирования, термообработки или брикетирования), либо просто непригодны для ковшевой обработки стали [5–7].

Сталеплавильные предприятия при закупке флюсов предъявляют требования как по химическому составу, так и по механическим свойствам. Флюсы должны поставляться в виде куска или брикета габаритными размерами 10–50 мм, содержанием мелкой фракции (0–5 мм) до 10 % общей массы и влажностью до 1 % в летний период и до 6,5 % в зимний период. Также потребитель может прописывать требования к прочностным свойствам брикетов/кусков. Сводные требова-

ния к химическому составу глиноземсодержащих флюсов представлены в табл. 1.

Необходимое количество глиноземсодержащего флюса для обработки на АКП определяется балансовым уравнением использования алюминия при ковшевой обработке:

$$Al_{\text{втор}} = Al_{\text{ост.ст}} + Al_{\text{раск}} + Al_{\text{возд}} + Al_{\text{шл}} + Al_{\text{исп}},$$

где $Al_{\text{ост.ст}}$ – алюминий остаточный; $Al_{\text{раск}}$ – алюминий на раскисление; $Al_{\text{возд}}$ – алюминий, окислившись кислородом воздуха; $Al_{\text{шл}}$ – алюминий, окислившись печным шлаком; $Al_{\text{исп}}$ – испарившийся алюминий.

Часть Al_2O_3 , необходимого для разжижения извести, образуется при взаимодействии алюминия с растворенным кислородом в стали, а часть при сгорании на поверхности шлака и его раскислении. Оставшуюся часть для наведения жидкоподвижного шлака вводят в виде флюса. Несмотря на то, что алюминий является технологически эффективным, он экономически невыгоден из-за высокой стоимости в качестве источника Al_2O_3 . По оценке, расход алюминия, согласно балансовому уравнению, составляет: $Al_{\text{ост.ст}}$ – 15 %; $Al_{\text{раск}}$ – 18 %; $Al_{\text{возд}}$ – 38 %; $Al_{\text{шл}}$ – 28 %; $Al_{\text{исп}}$ – 1 %.

Таким образом, в текущей ситуации из-за промышленных экологических ограничений и жестких требований к качеству сталей разработка технологии производства глиноземсодержащего флюса экологически безопасным и экономически выгодным способом является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важным аспектом при производстве флюсов методом спекания является тщательный подбор шихтовых материалов. Во-первых, шихтовые материалы не должны вносить с собой вредных примесей, которые не удаляются в процессе термообработки и в последующем могут перейти в обрабатываемую сталь. Во-вторых, материалы должны относительно просто брикетироваться, так как технология спекания подразумевает термообработку кускового материала. В-третьих, материал должен быть доступен на рынке.

Все большую популярность в последнее время набирает переработка отходов металлургического производства с получением товарных продуктов. Одним из таких отходов является пыль фильтров обжиговых печей. В данной работе рассматривается переработка пыли печей кальцинации глинозема и обжига известняка.

Кальцинация глинозема представляет собой дегидратацию гидроксида алюминия при высоких темпера-

Сводные требования к химическому составу глиноземсодержащих флюсов, предъявляемые металлургическими предприятиями России

Table 1. Consolidated requirements for the chemical composition of alumina-containing fluxes imposed by metallurgical enterprises in Russia

Элемент	Содержание в сталеплавильном флюсе, %		Особенности использования на АКП
	min	max	
не менее, %			
Al ₂ O ₃	50	80	Снижает температуру плавления CaO
не более, %			
CaO	20	30	Образуют с Al ₂ O ₃ легкоплавкую эвтектику
MgO	8	20	
Fe ₂ O ₃	2	6	Ухудшают процесс десульфурации
MnO	1,5	2,0	Ограничение по использованию шламов корундового производства и глиноземсодержащих руд без рафинирования
SiO ₂	3	15	
P _{общ} + S _{общ}	0,02	0,30	Переходят в металл и требуют дополнительного рафинирования
Cr ₂ O ₃	2	10	Образуют карбиды, ухудшающие последующую обработку
TiO ₂	1	5	Ограничение по использованию алюмотермических шлаков производства ферротитана и хрома металлического
V ₂ O ₅ + Nb ₂ O ₅	1	1	Восстанавливаются и переходят в металл
			Ограничение по использованию алюмотермических шлаков производства феррованадия и феррониобия
Na ₂ O + K ₂ O	1	8	Ограничение по использованию шлака от производства вторичного алюминия

турах (до 1200 °С) во вращающихся трубчатых печах или печах кипящего слоя и является завершающей операцией в технологической цепочке производства Al₂O₃. При протекании процессов в агрегатах, используемых для прокаливания различных материалов, неизбежно образуется наноразмерная пыль. Исследования, описанные в работе [8], показали, что размер наночастиц пыли находится в диапазоне 50 – 300 нм. В результате кальцинации около 14 % мелкодисперсной глиноземной пыли уносится из печи топочным газом, который направляется в мультициклоны и электрофильтры [9]. Данная пыль, содержащая наночастицы, не пригодна для использования в классической технологии электролитического разложения Al₂O₃, так как является гигроскопичной, что в последующем приводит к завышенному содержанию водорода в металлическом алюминии. Тем не менее, этот материал является пригодным для использования в черной металлургии в качестве источника Al₂O₃ в стапелавильных флюсах.

При выборе источника CaO для производства флюсов методом спекания следует руководствоваться цепочкой химических превращений: CaCO₃ → CaO → Ca(OH)₂ → CaCO₃.

Источником CaO могут выступать мелкодисперсные карбонатные породы, обожженная или гашеная известь. У каждого из них есть свои достоинства и недо-

статки. Известняк (CaCO₃) не требует предварительной подготовки перед брикетированием, но разложение в процессе спекания на CaO и CO₂ сопровождается поглощением тепла (178 кДж/моль). Использование обожженной извести (CaO) не приводит к значительной потере массы при спекании из-за отсутствия кристаллогидратной влаги, но гашение в процессе брикетирования сопровождается выделением тепла (65 кДж/моль), что является не технологичным. Гашеная известь (Ca(OH)₂) имеет ряд преимуществ относительно других вышеперечисленных материалов:

- не требует предварительной подготовки (может гидратировать на воздухе в процессе хранения);
- удобство при брикетировании (не сопровождается выделением тепла при взаимодействии с водой);
- поглощение тепла при разложении на CaO и H₂O (65 кДж/моль) в процессе спекания почти в 3 раза меньше, чем при разложении CaCO₃.

В промышленных условиях обожженную известь получают путем прокаливания карбонатных пород в шахтных или вращающихся печах при температуре 1000 – 1250 °С [10]. По аналогии с кальцинацией глинозема, в процессе обжига карбонатных пород образуется микроразмерная пыль (6 – 60 мкм), которая осаживается либо в рукавных фильтрах, либо в электрофильтрах [11]. Данная пыль схожа по составу

с обжигаемым материалом, но из-за фракции склонна к более быстрой гидратации на воздухе при хранении. Данная мелкодисперсная пыль также может использоваться в качестве сырья для производства спеченных глиноземо-известковых флюсов.

Важной частью работы с дисперсными материалами является их подготовка к термообработке. В данной работе применялось холодное брикетирование. Основываясь на удачных опытах брикетирования пористых глиноземсодержащих материалов [12], в качестве связующего использовали материал на основе полиакриламида, который имеет малый расход (0,6 % массы брикетируемого сырья) и полностью удаляется при температурах спекания.

Технология производства устойчивых к гидратации и последующему разрушению глинозем-известковых флюсов методом спекания из чистых компонентов включает в себя следующие операции:

- изготовление брикетов из чистых компонентов;
- нагрев материала до температуры выдержки;
- выдержка при постоянной температуре;
- охлаждение на воздухе.

В лабораторных условиях спекание проводили в печи сопротивления с графитовым нагревателем. За основу производства флюсов взяты технологии обжига рудных окатышей и производства агломерата. Температурный интервал проведения лабораторных экспериментов выбирали согласно существующим технологическим особенностям топливных агрегатов. Максимальная температура обжига железорудных

окатышей, согласно литературным данным, составляет 1400 °C [13 – 17], а обжига хромитовых окатышей – 1400 – 1500 °C [18 – 22]. Исходя из этого, выбран температурный интервал выдержки – 1200 – 1500 °C. Средняя скорость нагрева в лабораторных экспериментах составляла 20 °C, а время выдержки при постоянной температуре варьировалось от 15 до 25 мин. Термообработанные спеченные брикеты охлаждали на воздухе, измеряли их массу и геометрические параметры. После определения всех выходных параметров брикеты оставляли для хранения на воздухе (при температуре 21 °C и относительной влажности воздуха 50 %) для фиксации изменения массы. Взвешивание и фиксирование изменения массы брикетов проводили раз в семь дней до момента, когда масса брикета перестала изменяться.

Проведены две серии экспериментов с разными источниками CaO: смесь гидратированной извести и карбоната кальция в соотношении 1:1 (серия 1) и гидратированная известь (серия 2). Долю Al_2O_3 в брикете до спекания для обоих случаев варьировали от 50 до 80 % (с шагом 5 %). Химический состав исходных материалов приведен в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После остывания брикетов на воздухе проводили внешнюю оценку состояния после спекания. По внешнему виду термообработанные брикеты можно разделить на четыре условные группы (рис. 1).

Таблица 2

Химический состав исходных материалов

Table 2. Chemical composition of raw materials

Материал	Пыль Al_2O_3			Пыль CaO				
Элемент	Al_2O_3	Fe_2O_3	$Na_2O + K_2O$	CaO	MgO	SiO_2	P	S
Содержание, %	99,53	0,01	0,45	98,76	0,50	0,70	0,01	0,03

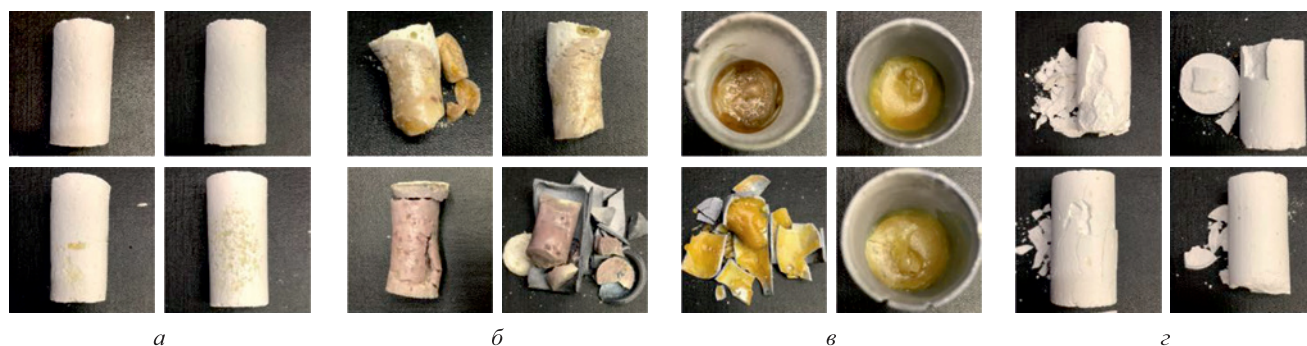


Рис. 1. Внешний вид термообработанных брикетов:
а – спеченные; б – оплавленные; в – расплавившиеся; з – разрушившиеся/треснувшие

Fig. 1. Appearance of heat-treated briquettes:
a – sintered; б – semi-melted; в – melted; з – collapsed/cracked

$$\Delta m_{\text{гидр}} = 6,5334 - 0,0041 t_{\text{выд}} + 0,7228(\% \text{Ca(OH)}_2)_{\text{с}}$$

$$\Delta m_{\text{гидр}} = 1,3671 + 0,0135(\% \text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{с}} - 0,001 t_{\text{выд}}$$

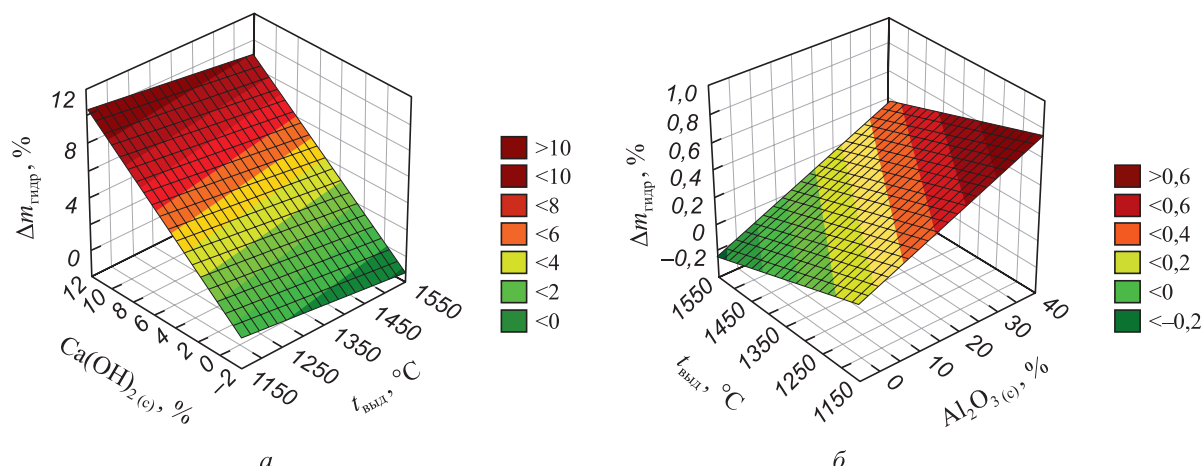


Рис. 2. Влияние температуры выдержки, содержания Ca(OH)_2 и Al_2O_3 в спеченных материалах на изменение массы: а – при использовании смеси CaCO_3 и Ca(OH)_2 ; б – при использовании Ca(OH)_2

Fig. 2. Influence of holding temperature, Ca(OH)_2 and Al_2O_3 content in sintered materials on change in mass: а – when using a mixture of CaCO_3 and Ca(OH)_2 ; б – when using Ca(OH)_2

Для обработки результатов и выявления факторов, влияющих на гидратационное разрушение спеченных брикетов, использовали программный комплекс STATISTICA. В качестве зависимой переменной выступала величина прироста массы в процессе хранения на воздухе (%), а в качестве независимых – температура выдержки при спекании ($^{\circ}\text{C}$), время выдержки при спекании (мин), состав исходных брикетов (%), изменение плотности и объема брикетов в процессе спекания (%), фазовый состав спеченных брикетов после выдержки на воздухе (%). На рис. 2 представлены основные факторы, влияющие на гидратационное разрушение брикетов для двух серий экспериментов.

Помимо количественной использовали качественную оценку визуального состояния брикетов в процессе хранения на воздухе. Для экспериментов из серии 1 первые признаки гидратационного разрушения, сопровождающиеся приростом массы, наблюдались уже на 7-й день хранения на воздухе, а прирост массы закончился на 56-й день наблюдений. Для экспериментов из серии 2 первые признаки гидратационного разрушения наблюдались лишь на 28-й день хранения на воздухе, а прирост массы закончился на 100-й день наблюдений. Результаты рентгеноструктурного анализа спеченных брикетов, не разрушившихся при хранении на воздухе, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Рентгеноструктурный анализ спеченных брикетов, не разрушившихся при хранении на воздухе

Table 3. X-ray structural analysis of sintered briquettes not collapsed during storage in air

Номер серии	Доля Al_2O_3 в брикете до спекания, %	Температура выдержки, $^{\circ}\text{C}$	Время выдержки, мин	Al_2O_3 , %	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, %	$12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, %	$\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, %	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, %	$\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, %
1	50	1500	15	0	9,10	90,90	0	0	0
1	75	1500	15	22,90	25,10	0	38,20	0	13,80
2	50	1200	15	0	0	78,30	0	21,70	0
2	50	1200	25	0	0	65,90	0	34,10	0
2	70	1400	20	14,00	53,40	15,30	16,10	1,20	0
2	55	1400	20	4,40	3,40	92,30	0	0	0
2	50	1400	20	0	2,50	97,50	0	0	0
2	50	1500	25	0	0	86,30	0	13,70	0
2	80	1500	25	26,90	25,90	0	40,60	6,50	0

Предельное содержание CaO и Al₂O₃ в спеченных брикетахTable 4. Limit content of CaO and Al₂O₃ in sintered briquettes

Номер серии	Предельное содержание элементов в брикете, %	Температура выдержки, °C						
		1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500
1	CaO (Ca(OH) ₂)	2,3 (3,0)	2,5 (3,3)	2,6 (3,5)	2,9 (3,8)	3,1 (4,1)	3,6 (4,7)	3,6 (4,7)
2	Al ₂ O ₃	9,5	13,2	16,9	20,6	24,3	28,0	31,7

Результаты комплексной оценки по уравнениям регрессии предельно допустимого содержания свободных CaO и Al₂O₃ в спеченных брикетах для двух лабораторных серий представлены в табл. 4.

Определено, что в серии 1, где процесс образования алюминатов кальция сопровождается разложением карбоната кальция и гидроксида кальция, необходимо повышение температуры (>1500 °C) и/или продолжительности выдержки (>25 мин) для завершения всех структурных превращений. Серия 2 показывает, что устойчивые к гидратации материалы можно производить при относительно низкой температуре (начиная с 1200 °C) в заданном временном интервале (15 – 25 мин).

Выводы

Предельно допустимое содержание CaO в спеченных брикетах, не приводящее к разрушению спеченного материала при хранении на воздухе (в случае использования в качестве источника CaO смеси гидратированной извести и карбоната кальция), находится в диапазоне 2,3 – 3,6 % в зависимости от температуры выдержки при спекании, что соответствует приросту массы 3,8 %.

Предельно допустимое содержание Al₂O₃ в спеченных брикетах, не приводящее к разрушению спеченного материала при хранении на воздухе (в случае использования в качестве источника CaO гидратированной извести), находится в диапазоне 9,5 – 31,7 % в зависимости от температуры выдержки при спекании, что соответствует приросту массы 0,3 %.

В существующих топливных агрегатах возможно производить флюсы только при применении в качестве источника CaO гидратированной извести (серия 2), так как при использовании в качестве источника CaO смеси гидратированной извести в сочетании с карбонатом кальция (серия 1) необходима температура выдержки выше 1500 °C, что является невозможным для существующих топливных агрегатов, либо увеличения продолжительности выдержки до более, чем 25 мин.

Лучшим источником CaO для производства флюсов методом спекания является гидратированная пыль обжиговых печей известняка, так как в процессе спе-

кания поглощение тепла в 3 раза меньше относительно известняка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Nekrasov I.V., Metelkin A.A., Egiazar'yan D.K. Optimization of the slag composition in ladle treatment of steel for increasing the resistance of refractories and promoting slag reuse. *Metallurgist*. 2018;62: 723–728. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0714-y>
- Ларионов Л.М., Кондратьев В.В., Кузьмин М.П. Пути использования углеродсодержащих отходов алюминиевого производства. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017;21(4(123)):139–146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-139-146>
Larionov L.M., Kondratyev V.V., Kuzmin M.P. Ways of using carbon-containing waste from aluminum production. *iPolytech Journal*. 2017;21(4(123)):139–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-139-146>
- Sarkar S., Anand V., Ranjan R., Borra C.R., Sahoo P.P. Elimination of fluorspar use and reduction in lime consumption at ladle furnace by reutilizing alumina-rich ladle furnace slag. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022;8(1):398–408. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00492-1>
- Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Михеенков М.А., Егиазарьян Д.К., Лобанов Д.А., Неугодников О.В., Иванов Б.А. Опыт использования глиноземистого алюминийсодержащего флюса при ковшевой обработке «безалюминиевых» сталей. *Новые огнеупоры*. 2017;(3): 75–77. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-3-75-77>
Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Miheenkova M.A., Egiazar'yan D.K., Lobanov D.A., Neugodnikov O.V., Ivanov B.A. Experience in the use of aluminous aluminum-containing flux during ladle processing of “aluminum-free” steels. *Novye огнеупоры (New Refractories)*. 2017;(3):75–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-3-75-77>
- Viklund-White C., Johansson H., Ponkala R. Utilization of spent refractories as slag formers in steelmaking. In: *Proceedings of the 6th Int. Conf. on Molten Slags, Fluxes and Salts*. Stockholm, Sweden; 2000:12–17.
- Ramaswamy P., Gomes S.A., Ravichander N.P. Utilization of aluminum dross: Refractories from industrial waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;577(1):012101. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012101>
- Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N. Trends in red mud utilization – A review. *Mineral Processing & Extractive*

- Metallurgy Review*. 2004;26(1):1–29.
<https://doi.org/10.1080/08827500490477603>
8. Давыдов С.Я., Апакашев Р.А., Корюков В.Н. Улавливание наноразмерной фракции частиц глиноземного производства. *Новые огнеупоры*. 2016;(2):12–15.
Davydov S.Ya., Apakasev R.A., Koryukov V.N. The collection of nanoscale particles in alumina production. *Novye огнеупоры (New Refractories)*. 2016;(2):12–15. (In Russ.).
 9. Давыдов С.Я., Апакашев Р.А., Корюков В.Н. Утилизация пыли печей кальцинации глинозема, содержащей наночастицы. *Новые огнеупоры*. 2014;(8):10–13.
Davydov S.Ya., Apakasev R.A., Koryukov V.N. The recycling of the alumina calciner kiln dust containing nanoparticles. *Novye огнеупоры (New Refractories)*. 2014;(8):10–13. (In Russ.).
 10. Нестеров А.В., Датукашвили Д.О. Производство кальциевой извести в России. *Строительные материалы*. 2017;(3):52–59.
Nesterov A.N., Datukashvili D.O. Production of high-calcium lime in Russia. *Stroitel'nye materialy*. 2017;(3):52–59. (In Russ.).
 11. Мантула В.Д., Шапаренко А.В., Павлюченко А.М., Фадеев А.В., Лыжник Г.В. Применение рукавных фильтров в газоочистках агрегатов известково-обжигового и доломитного производств. *Экология и промышленность*. 2017;(1(50)):29–35.
Mantula V.D., Shaparenko A.V., Pavlyuchenko A.M., Fadeev A.V., Lyzhnik G.V. Application of bag filters in gas cleaning of limekiln and dolomite processes. *Ehkologiya i promyshlennost'*. 2017;(1(50)):29–35. (In Russ.).
 12. Аксенова В.В., Алимбаев С.А., Павлов А.В., Мустафин Р.М. Брикетирование пористых глиноземсодержащих материалов на органических связующих. *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2021;64(5):323–329.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-323-329>
Aksenova V.V., Alimbaev S.A., Pavlov A.V., Mustafin R.M. Briquetting of porous alumina-containing materials with organic binders. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(5):323–329. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/03680797-2021-5-323-329>
 13. Zhang Y.B., Chen X.J., Su Z.J., Liu S., Chen F., Wu N.Y., Jiang T. Improving properties of fluxed iron ore pellets with high-silica by regulating liquid phase. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2021;29:1381–1392.
<https://doi.org/10.1007/s42243-021-00665-4>
 14. Fan X.H., Gan M., Jiang T., Yuan L.S., Chen X.L. Influence of flux additives on iron ore oxidized pellets. *Journal of Central South University of Technology*. 2010;17(4):732–737.
<https://doi.org/10.1007/s11771-010-0548-7>
 15. Li G., Jiang T., Zhang Y., Tang Z. Recrystallization of Fe₂O₃ during the induration of iron ore oxidation pellets. *Recrystallization*. 2012;13:329–350. <https://doi.org/10.5772/32738>
 16. Umadevi T., Lobo N.F., Desai S., Mahapatra P.C., Sah R., Prabhu M. Optimization of firing temperature for hematite pellets. *ISIJ International*. 2013;53(9):1673–1682.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.1673>
 17. Forsmo S.P.E., Forsmo S.E., Samskog P.O., Björkman B.M.T. Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets. *Powder Technology*. 2008;183(2):247–259.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.07.032>
 18. Тимофеева А.С., Кожухов А.А., Никитченко Т.В. Исследование механизмов упрочнения железорудных окатышей в процессе обжига. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020;76(11):1107–1112.
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-11-1107-1112>
Timofeeva A.S., Kozhukhov A.A., Nikitchenko T.V. Study of iron ore pellets hardening mechanisms in the process of burning. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;76(11):1107–1112. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-11-1107-1112>
 19. Акбердин А.А., Ким А.С., Зинякова О.Н. Совершенствование технологии производства хромитовых окатышей. *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2014;57(9):24–28.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-9-24-28>
Akberdin A.A., Kim A.S., Zinyakova O.N. Improvement of production technology of chromite pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014;57(9):24–28. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-9-24-28>
 20. Ким А.С., Акбердин А., Исагулов А., Султангазиев Р. Взаимосвязь процессов фазообразования и качества хромитовых окатышей при упрочняющем обжиге. *Труды Университета*. 2019;(4):24–27.
Kim A.S., Akberdin A., Isagulov A., Sultangaziev R. Relationship between phase formation processes and the quality of chromite pellets during hardening firing. *Proceedings of the University*. 2019;(4):24–27. (In Russ.).
 21. Акбердин А.А., Ким А.С., Акбердин Р.А. Agglomeration of refractory chromite ore. *Proceedings of INFACON XIII – 13th Int. Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry*. 2020:1–4.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Виктория Владимировна Аксенова, аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
ORCID: 0009-0001-2611-2057
E-mail: axenovaviki@gmail.com

Александр Васильевич Павлов, д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
ORCID: 0000-0003-3773-9469
E-mail: pav-gnts@misys.ru

Viktoriya V. Aksenova, Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0009-0001-2611-2057
E-mail: axenovaviki@gmail.com

Aleksandr V. Pavlov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0003-3773-9469
E-mail: pav-gnts@misys.ru

Георгий Михайлович Марков, младший научный сотрудник,
Национальный исследовательский технологический универси-
тет «МИСИС»
ORCID: 0000-0001-7285-7888
E-mail: markov.sci@gmail.com

Georgii M. Markov, Junior Researcher, National University of Science
and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0001-7285-7888
E-mail: markov.sci@gmail.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

В. В. Аксенова – планирование и проведение экспериментов, определение химического состава исходных материалов методом волнодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии, обработка полученных экспериментальных данных, подготовка текста статьи.

А. В. Павлов – определение цели исследования, планирование и организация экспериментов, обсуждение результатов и выводов.

Г. М. Марков – определение фазового состава спеченных образцов методом рентгенодифрактометрии.

V. V. Aksenova – planning and conducting experiments, determination of chemical composition of the starting materials by wave-dispersive X-ray fluorescence spectrometry, processing the experimental data obtained, writing the text.

A. V. Pavlov – setting the research goal, planning and organization of experiments, discussion of results and conclusions.

G. M. Markov – determination of phase composition of sintered samples by X-ray diffraction.

Поступила в редакцию 10.10.2023
После доработки 31.10.2023
Принята к публикации 11.11.2023

Received 10.10.2023
Revised 31.10.2023
Accepted 11.11.2023