

with culture liquid - allow significantly increase gold recovery. The solid sodium peroxide is applied to oxygenate the ore mass (ratio $\text{Na}_2\text{O}_2:\text{Ore} = 1:100$). Decomposition of the peroxide at leaching provides increase of gold recovery by $\sim 5\%$ and speeds of leaching process ~ 1.5 times. Enlarged tests of biochemical technology for gold recovery from the ore were carried out at the optimum leaching conditions found at laboratory researches and the initial data for projection of heap leaching site were issued. The researches showed the benefits of combined chemical and biochemical heap leaching of low-grade ores, which leads to intensification of the process of gold extraction and saving of sodium cyanide. Ore cyanidation results showed that in the experimental conditions gold extraction degree is quite high. Bacterial gold opening raises the extraction by 8-13 % and the total gold recovery up to 83 %.

Key words: ore, heap leaching, gold, Acidithiobacillus ferrooxidans, extraction, percolation leaching, bacteria, biochemical technology.

Поступила 13.02.2015



УДК 669.295/15/787.046:541.1

Комплексное использование
минерального сырья. № 1. 2015

М. А. НАЙМАНБАЕВ*, С. М. УЛАСЮК, М. И. ОНАЕВ,
Ж. К. ДЖУРКАНОВ, Н. Ш. АЛЖАНБАЕВА

АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения»,
Алматы, *madali_2011@inbox.ru

ВЛИЯНИЕ БРИКЕТИРОВАНИЯ ИЛЬМЕНИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ И ВИДА ВОССТАНОВИТЕЛЯ НА СОСТАВ ПРОДУКТОВ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАВКИ

Определены условия брикетирования. Показано, что прочность брикетов зависит от количества связующего вещества, природы и крупности углеродистого восстановителя, крупности зерен ильменитового концентрата. Проведены исследования по плавке брикетов шихты, состоящей из ильменитового концентрата и восстановителя. В качестве восстановителя использовались коксовая мелочь, антрацит и полукокс, полученный из шубаркольского угля. Определен оптимальный расход восстановителя: для коксовой мелочи и полукокса – 70 %, для антрацита – 90 % от необходимого количества, используемого для восстановления оксидов железа до металла. При восстановительной плавке брикетов, состоящих из ильменитового концентрата и коксовой мелочи, получены шлаки, содержащие 84,9 % TiO_2 и 6,9 % FeO; с антрацитом – 85,6 % TiO_2 и 6,1 % FeO; с полукоксом, полученным из шубаркольского угля – 86,0 % TiO_2 и 5,9 % FeO. При плавке брикетированной шихты обеспечивается более тесный контакт ильменита с восстановителем, восстановление протекает полнее и более интенсивно. В результате время плавки сокращается на 0,5 ч, а температура плавки на 50 °С. Для переработки титансодержащего сырья рекомендовано использовать вместо импортного антрацита полукокс, полученный из казахстанского шубаркольского угля.

Ключевые слова: электроплавка, ильменитовый концентрат, брикетирование, оксид титана, оксид железа, титановый шлак, шихта.

Введение. Подготовка шихтовых материалов к плавке в руднотермических печах имеет большое значение для эффективности процесса. При выплавке титановых шлаков подготов-

ка сырья проводится методом брикетирования шихты.

Вопрос о целесообразности брикетирования концентратов перед плавкой является дискус-

сионным. Одни исследователи [1, 2] считают брикетирование сырья экономически эффективным. При переходе от порошковой шихты к брикетированной, по их данным, примерно на 20-25 % увеличивается производительность электропечей, снижается удельный расход электроэнергии и восстановителя.

При плавке брикетированной шихты 80 % кислорода оксидов железа удаляется на твердофазной стадии процесса и 20 % – по расплавлению шихты. При плавке порошкового концентрата углерод расходуется на восстановление оксидов железа и оксидов титана, вследствие чего образуется значительное количество низших оксидов титана в шлаке. В результате повышаются температура плавления и электропроводность титанового шлака и увеличивается расход восстановителя. Восстановление в расплаве приводит шлак к кипению и вспучиванию, электроды поднимаются на поверхность расплава, прогрев шлака замедляется, расход электроэнергии растет [3].

С.И. Денисов и В.Г. Распопин [4] считают экономически целесообразной плавку порошковой шихты. По их мнению, преимущества периодической плавки брикетированной шихты не перекрывают затрат на брикетирование. Применение брикетированной шихты будет экономически выгодным в случае непрерывной выплавки титановых шлаков. При переработке порошковой шихты слабо развиваются процессы восстановления в твердой фазе. Это удлиняет процесс плавки, увеличивает затраты на производство шлака. Использование порошковой шихты осложняет организацию непрерывной выплавки титановых шлаков и затрудняет применение печей с закрытым сводом.

На основании экспериментальных данных при рассмотрении различных вариантов шихтоподготовки установлено, что по убыванию скорости восстановления шихты её виды располагаются в следующем порядке: брикеты, гранулы, порошковая шихта. Показано, что только при увеличении количества брикетов (более 40-50 %) в шихте улучшаются показатели плавки по сравнению с порошковым материалом [5].

Брикетирование обеспечивает более тесный контакт между оксидами и восстановителем и повышает степень восстановления на 10-15 %. При выплавке титановых шлаков из порошковой и брикетированной шихты было установлено, что для получения шлака, содержащего 3-5 % FeO,

необходимо следующее количество восстановителя: для порошковой шихты 10-12 % антрацита, 8-10 % нефтекокса и 12-14 % газового угля; для брикетированной шихты соответственно 9,5-10,5 %, 7-8 % и 10,5-11 % (к массе концентрата) [6].

Целью данной работы является исследование состава продуктов процесса электроплавки брикетированного ильменитового концентрата в зависимости от вида и количества восстановителя в шихте.

Методы анализа. Физико-химические свойства брикетов и шлаков изучались с применением химико-аналитического, минералогического и рентгенофазового методов анализа.

Минералогическое исследование проб проводилось под микроскопом МИН-8 при увеличении 320х, а также под микроскопом OLYMPUS при увеличении 200х в проходящем свете в иммерсионной среде и в полированных шлифах в отраженном свете под инвертированным микроскопом Leica. Микрофотографии проб в отраженном свете изготовлены при увеличении 300х под инвертированным микроскопом Leica, в проходящем и отраженном свете под микроскопом OLYMPUS при увеличении 100х, 200х с помощью программы Stream BasicR.

Рентгенофазовый анализ полученного шлака проведен на аппарате D8 Advance (Bruker). Обработка полученных данных дифрактограмм и расчет межплоскостных расстояний проводились с помощью программного обеспечения EVA. Расшифровка проб и поиск фаз выполнены по программе Search/match с использованием Базы данных карточек ASTM.

Опытные плавки проводились в лабораторной высокотемпературной трубчатой вертикальной печи марки RHTV 120-600/С 40 Nabertherm.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. Проведены исследования по брикетированию шихты, состоящей из ильменитового концентрата, восстановителя и связующего. Исследования проведены на ильменитовом концентрате Сатпаевского месторождения следующего состава, мас. %: 49,6 TiO₂, 40,7 Fe₂O₃, 3,6 SiO₂, 2,12 Al₂O₃, 0,2 Cr₂O₃, 0,34 CaO+MgO, 2,2 MnO, 0,1 K₂O, 0,25 Na₂O, 0,31 V₂O₅.

В качестве восстановителей испытывались коксовая мелочь, антрацит и полукокс, полученный из шубаркольского угля. Антрацит, используемый при производстве титановых шлаков, является импортным и дорогостоящим сырьем.

Коксовая мелочь и полукокс, полученный из местного шубаркольского угля, не уступают антрациту по восстановительной способности и значительно дешевле по стоимости [7].

Как известно, процесс плавки концентрата зависит от количества восстановителя в шихте. Избыток восстановителя приводит к перевосстановлению диоксида титана до низших оксидов, получению тугоплавкого, вязкого шлака. При недостатке восстановителя остается повышенным содержание оксида железа в расплаве, что увеличивает продолжительность плавки [8]. Поэтому были проведены плавки с добавкой различного количества восстановителя (50-100 % от теоретически необходимого для восстановления оксидов железа до металла). Количество восстановителя в шихте рассчитывали в соответствии с анализом исходных материалов на восстановление оксидов железа до металла и диоксида титана до Ti_3O_5 [9].

Характеристика восстановителей, используемых при проведении исследований, приведена в таблице 1.

Содержание влаги (W^l), золы (A^d) и летучих (V^{daf}) в восстановителе оказывает существенное влияние на содержание диоксида титана в шлаке: чем их содержание выше, тем ниже содержание диоксида титана [8].

Таблица 1 – Характеристика восстановителей

Показатель	Антрацит	Коксовая мелочь	Полукокс, полученный из шубаркольского угля
Технический анализ, %:			
W^l	6,0	1,0	0,89
A^d	6,0	10,0	10,08
V^{daf}	2,37	3,5	3,7
Содержание углерода, %	80	76,0	72,5
Содержание серы, %	1,2	1,4	0,47
Содержание в золе, %:			
SiO_2	52,80	50,32	49,84
Al_2O_3	26,5	26,52	21,26
Fe_2O_3	10,7	11,7	8,98
CaO	3,5	4,40	2,8
MgO	2,43	1,83	1,91

Гранулометрический состав концентрата и восстановителей приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Гранулометрический состав концентрата и восстановителей, %

Класс крупности, мм	Выход, %			
	ильменитовый концентрат	антрацит	коксовая мелочь	полукокс, полученный из шубаркольского угля
+ 1	–	0,85	1,87	0,75
-1+0,5	2,91	12,3	15,3	8,19
-0,5+0,15	54,51	61,2	48,88	60,2
-0,15+0,071	18,68	11,63	18,32	25,3
-0,071+0	23,9	14,02	15,63	5,56
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0

По гранулометрическому составу шихта (таблица 2) состоит только на 26-40 % из класса -0,15+0,00 мм. Для более равномерного распределения компонентов и достижения необходимой крупности частиц шихты ее дополнительно измельчали в шаровой мельнице до крупности 70 % по классу -0,071 мм. В процессе измельчения происходило также тщательное перемешивание шихты.

Готовую шихту увлажняли водой, а затем брикетировали методом прессования на гидравлическом прессе при удельном давлении прессования 20 Н/мм². Благодаря тонкому измельчению в брикетах достигается благоприятный контакт между оксидом и восстановителем, а также обеспечиваются наименьшая электропроводность и повышенная тугоплавкость шихты. Указанные факторы обеспечивают опережающее развитие реакций восстановления по сравнению с плавлением и способствуют получению технологических преимуществ при плавке брикетированной шихты [7, 10]. В качестве связующего использовалась бентонитовая глина.

Изучено влияние количества связующего на прочность брикетов при использовании разных восстановителей (рисунок 1).

Результаты испытания брикетов на прочность в зависимости от количества связующего в шихте показали, что для сатпаевского ильменитового концентрата оптимальное количество связующего в шихте составляет 1 % от веса концентрата.

Прочность брикетов зависит также от природы и крупности углеродистого восстановителя, от крупности зерен ильменитового концентрата. Углеродистый восстановитель должен удовлетворять двум основным требованиям: иметь низкую зольность и малый размер частиц. Последнее важно для тесного контак-

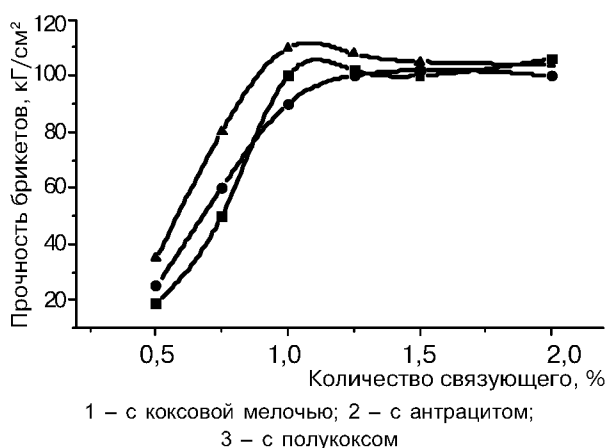


Рисунок 1 – Изменение прочности брикетов от количества связующего и вида восстановителя в шихте

та углерода с концентратом и обеспечения однородности брикета.

Исследовано также влияние давления брикетирования на прочность брикетов при оптимальном расходе бентонита. Прочность брикетов повышается при увеличении давления прессования до 100-110 кг/см². Дальнейшее повышение давления практически не увеличивает прочности брикетов.

Таким образом, определены условия брикетирования: степень измельчения материалов – 70 % по классу -0,074 мм, количество и вид связующего – бентонитовая глина в количестве 1 % от массы концентрата. Прочность брикетов зависит от давления при прессовании, которое, согласно нашим исследованиям, должно составлять порядка 100-110 кг/см². Кроме того, установлено, что прочность брикетов зависит также от влажности и пластичности шихты. Уменьшение остаточной влажности с 2 до 1 % позволяет увеличить прочность брикетов почти в 2 раза, однородность шихты улучшает ее пластичность. Полученные брикеты имели цилиндрическую форму и размер 15х18 мм и обладали удовлетворительной прочностью. Сушка брикетов осуществлялась при температуре 100-110 °С.

Поставлены 3 серии опытов по плавке брикетов, приготовленных с различным видом и количеством восстановителя.

Расход восстановителя также подбирался исходя из результатов предыдущих исследований по плавке порошковой шихты [7]. Оптимальные расходы восстановителей были следующие: с коксовой мелочью (оптимальный расход 9,4 г) получены шлаки, содержащие 85,2 % TiO_2 и 6,4 % FeO; с антрацитом (оптимальный расход 8,96 г) – 84,8 % TiO_2 и 6,2 % FeO; с полукоксом,

полученным из шубаркольского угля, (оптимальный расход 7,85 г) – 84,5 % TiO_2 и 6,5 % FeO.

Расход восстановителей при брикетировании шихты составлял 90, 70, 50 и 30 % от оптимального расхода, определенного при плавке порошковой шихты.

Результаты проведенных исследований по плавке брикетов представлены в таблице 3, химический состав полученных шлаков – в таблице 4.

Таблица 3 – Зависимость выхода шлака и металла от вида и количества восстановителя в брикетах

Расход восстановителя	Получено продуктов плавки			
	шлак		металл	
	%	г	%	г
<i>Коксовая мелочь</i>				
30	72,3	81,8	16,1	18,2
50	61,2	68,7	27,8	31,3
70	59,1	66,7	29,5	33,3
90	58,3	64,8	31,7	35,2
<i>Антрацит</i>				
30	73,1	80,5	17,9	19,5
50	62,1	68,2	29,4	31,8
70	60,6	67,8	28,7	32,2
90	58,3	65,1	31,2	34,9
<i>Полукокс, полученный из шубаркольского угля</i>				
30	71,7	83,1	14,5	16,9
50	59,1	68,4	27,3	31,6
70	58,3	68,6	26,7	31,4
90	57,4	67,3	27,9	32,7

Таблица 4 – Химический состав титановых шлаков

№ плавки	Количество восстановителя, % от необходимого	Содержание, %					
		TiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO+MgO
Коксовая мелочь							
1	30	71,6	13,2	1,1	3,6	1,7	0,8
2	50	84,2	6,7	1,2	3,5	1,9	0,7
3	70	85,5	5,9	1,1	3,6	1,8	0,8
4	90	84,8	6,9	1,1	3,5	1,7	0,8
Антрацит							
5	30	67,8	14,2	1,2	3,6	1,9	0,7
6	50	84,1	5,8	1,1	3,1	2,0	0,6
7	70	85,6	6,1	1,2	3,4	1,8	0,6
8	90	84,9	6,0	1,2	3,5	2,1	0,5
Полукокс, полученный из шубаркольского угля							
9	30	68,3	13,9	1,2	3,3	2,0	0,5
10	50	84,2	7,1	1,3	3,5	1,9	0,6
11	70	86,0	5,9	1,2	3,4	1,8	0,6
12	90	85,3	6,8	1,1	3,5	2,0	0,8

Количество углеродистого восстановителя в шихте имеет большое значение и определяет технологические показатели электроплавки. С увеличением расхода восстановителя в шихте от 30 до 90 % от необходимого для восстановления оксидов железа до металла повышается выход самого металла: при использовании коксовой мелочи – от 18,2 до 35,2 %; антрацита – от 19,5 до 34,9 %; полукокса – от 16,9 до 32,7 % (таблица 3).

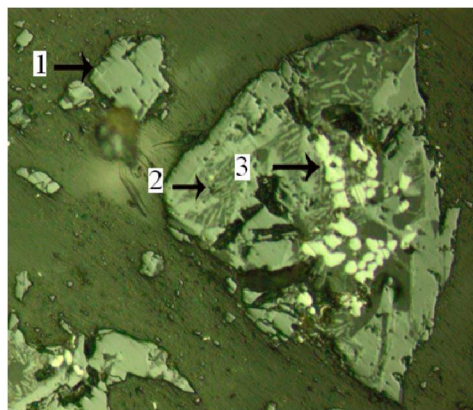
При плавке брикетированной шихты оптимальный расход восстановителя составляет 70 % для коксовой мелочи и полукокса и 90 % для антрацита от необходимого количества, используемого для восстановления оксидов железа до металла при плавке порошкового ильменита. Так, при плавке шихты с коксовой мелочью (70 %) выход шлака от массы шихты составил 66,7 %, металла 33,3 %; с антрацитом (90 %) – 65,1 и 34,9 %; с полукоксом (70 %) – 68,6 и 31,4 % соответственно (таблица 3).

Из таблицы 4 видно, что химический состав титановых шлаков при плавке брикетированного ильменитового концентрата с коксовой мелочью, антрацитом или полукоксом, полученным из шубаркольского угля, изменяется в незначительной степени, т.е. вид восстановителя не влияет на состав шлаков. Однако необходимо отметить, что при использовании в качестве восстановителя полукокса получаются более богатые по содержанию оксида титана шлаки 86,0 % TiO_2 и 5,9 % FeO (таблица 4, плавка № 11).

Содержание оксидов титана и железа в шлаках, полученных при плавке брикетированной шихты и при плавке гранулированной шихты, составило, %: при использовании в качестве восстановителя коксовой мелочи – 85,5 (82,3) TiO_2 , 5,9 (7,1) FeO; антрацита – 84,9 (83,9) TiO_2 , 6,0 (7,1) FeO; полукокса – 86,0 (84,5) TiO_2 , 5,9 (7,1) FeO. Время проведения плавки брикетированной шихты, как и гранулированной, составило 1,5 ч вместо 2 ч при плавке порошковой шихты. Температура плавки также уменьшилась с 1650 до 1600 °C.

Микроструктура титанового шлака представлена на рисунке 2.

Вид применяемого восстановителя не влияет на минералогический состав выплавленных шлаков. Основной составляющей полученных шлаков является аносовит, представляющий собой твердый раствор на основе Ti_3O_5 . Он заметно анизотропен, с высокой отражательной



1 - аносовит; 2 - стекловидная фаза;
3 - металлическое железо

Рисунок 2 – Микроструктура титанового шлака (увеличение в 300 раз)

способностью, представлен в виде светлых кристаллов (рисунок 2). Кроме того, в шлаке присутствует много мелких металлических включений, после травления $CuSO_4$ на поверхности некоторых зерен выпала металлическая медь, поскольку часть зерен представлена металлическим железом, остальные неотравившиеся зерна можно отнести к сплаву. Минералогические исследования состава титанового шлака подтверждаются результатами рентгенофазового анализа (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты рентгенофазового анализа титанового шлака

Наименование соединения	Формула	%
Аносавит	Ti_3O_5	59,4
Анализ	TiO_2	14,1
Псевдобрукит	Fe_2TiO_5	8,6
Оксид железа, марганца, титана	$Fe_2MnTi_3O_{10}$	5,2
Оксид кремния	SiO_2	3,6
Оксид титана	TiO	2,0
Вюстит	FeO	6,5

Выводы. Восстановление ильменитовой шихты затрудняется образованием промежуточных твердых растворов, содержащих в своем составе оксиды железа, а также ранним развитием процесса первичного шлакообразования. Для стабилизации развития этих процессов необходимо правильное распределение углерода на восстановление оксидов железа и титана. Совместное брикетирование восстановителя и концентрата способствует интенсификации процесса восстановления оксидов железа на твердофазной стадии.

Определены условия брикетирования: степень измельчения материалов – 70 % по классу -0,074 мм, в качестве связующего – бентонитовая глина в количестве 1 % от массы концентрата. Давление при прессовании брикетов должно быть порядка 100-110 кг/см².

Углеродистый восстановитель должен удовлетворять двум основным требованиям: иметь низкую зольность и малый размер частиц, последнее важно для тесного контакта углерода с концентратом и обеспечения однородности брикета. Вид используемого восстановителя не влияет на прочность брикетов.

Плавка брикетированной шихты существенно отличается от плавки порошковой шихты. При использовании брикетированной шихты обеспечивается более тесный контакт ильменита с восстановителем. Восстановление протекает полнее и более интенсивно, в результате время плавки сокращается на 0,5 ч, а температура плавки – на 50 °С.

Расход восстановителя сокращается на 20-30 % от необходимого для восстановления оксидов железа до металла. Избыток восстановителя приводит к перевосстановлению диоксида титана до низших оксидов, получению тугоплавкого, вязкого шлака и невозможности полного отделения металлического железа.

Химический состав титановых шлаков при плавке брикетированной шихты, состоящей из ильменитового концентрата с коксовой мелочью, антрацитом или полукоксом, полученным из шубаркольского угля, изменяется в незначительной степени и определяется полнотой протекания реакции восстановления оксидов железа и перевосстановления диоксида титана до низших оксидов. При восстановительной плавке брикетированной шихты ильменитового концентрата с коксовой мелочью получены шлаки, содержащие 84,9 % TiO₂ и 6,9 % FeO; с антрацитом – 85,6 % TiO₂ и 6,1 % FeO; с полукоксом, полученным из шубаркольского угля, – 86,0 % TiO₂ и 5,9 % FeO.

Плавка брикетов имеет большие преимущества, позволяет правильно организовать развитие процессов восстановления и шлакообразования, которые в конечном счете влияют на продолжительность плавки, удельный расход электроэнергии и др. Для переработки титаносодержащего сырья рекомендуется использовать вместо импортного антрацита полукоксы, полученный из казахстанского шубаркольского угля.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Резниченко В.А. Электротермия титановых руд. – М.: Наука, 1969. – 207 с.
- 2 Резниченко В.А., Рапопорт М.Б., Ткаченко В.А. Metallurgiya titana. – М.: Изд. АН СССР, 1963. – 199 с.
- 3 Бардин И.П., Резниченко В.А. Исследование процессов восстановления и шлакообразования при плавке ильменитовых концентратов // Титан и его сплавы. – М.: Изд. АН СССР, 1959. – Вып. 2. – С. 23-27.
- 4 Денисов С.И., Распопин В.Г. К вопросу об эффективности переработки сыпучей и брикетированной шихты при плавке титановых концентратов // Сб. тр. Ин-та титана. – М.: Metallurgiya, 1970. – Т. 4. – С. 23-28.
- 5 Резниченко В.А. Способы подготовки ильменитовых концентратов к плавке в руднотермических печах. // Известия АН СССР, Металлы. – 1967. – № 5. – С. 43-57.
- 6 Васютинский Н.А., Мовсесов Э.Е. Плавка ильменитовых концентратов на богатый титановый шлак // Известия АН СССР, Металлы. – 1965. – № 1. – С. 82-87.
- 7 Исследование физико-химических закономерностей распределения металлов в условиях бесфлюсовой и с добавлением флюсов электроплавки ильменитовых концентратов: отчет о НИР / НЦ НТИ. – Алматы, 2012. – 62 с. – Инв. № 0212РК00899.
- 8 Сергеев В.В., Безукладников А.Б., Мальшин В.М. Metallurgiya titana. – М.: Metallurgiya, 1979. – 263 с.
- 9 Павлов А.В., Шаяхметов Б.М., Онаев М.И., Шмидт Е.В., Алыбаев Ж.О. О научно-практических аспектах и резервах повышения технико-экономических показателей эксплуатации электропечей большой мощности по выплавке высокотитанистых шлаков из ильменитов // Комплексное использование минерального сырья. – 2001. – № 6. – С. 64-70.
- 10 Байсанов С.О., Нурғали Н.З., Алмағабетов М.С., Жумағалиев Е.К., Исин Д.К. Выбор восстановителя для выплавки богатого титанового шлака из концентратов месторождения Шокаш // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2008. – С. 132-136.

REFERENCES

- 1 Reznichenko V.A. *Elektrotermiya titanovykh rud.* (Electrothermy of titanium ores). Moscow: Nauka. **1969.** 207 (in Russ.).
- 2 Reznichenko V.A., Rapoport M.B., Tkachenko V.A. *Metallurgiya titana.* (Metallurgy of titanium). Moscow: Publish. Academy of Sciences of the USSR. **1963.** 199 (in Russ.).
- 3 Bardin I.P., Reznichenko V.A. *Issledovanie protsessov vosstanovleniya i shlakobrazovaniya pri plavke il'menitovykh kontsentrats. V sb.: Titan i ego splavy.* (Investigation of reduction and slag-making processes at smelting of ilmenite concentrates Tita-

nium and its alloys: collection). Moscow: Publish. Academy of Sciences of the USSR. **1959**. 2. 23-27 (in Russ.).

4 Denisov S.I., Raspopin V.G. *K voprosu ob effektivnosti pererabotki sypuchey i briketirovannoi shikhty pri plavke titanovykh kontsentratorov*. Sb. tr. Instituta titana. (To question of effectiveness of friable and briquette charge processing during titanium concentrates melting: collection). Moscow: Metallurgy. **1970**. 4. 23-28 (in Russ.).

5 Reznichenko V.A. *Sposoby podgotovki il'menitovykh kontsentratorov k plavke v rudnotermicheskikh pechakh*. (Method of ilmenite concentrates preparation for melting in ore-thermal furnaces). *Izvestiya of Academy of Sciences of the USSR. Metallurgy = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals*. **1967**. 5. 43-57 (in Russ.).

6 Vasyutinskij N.A., Movsesov E.E. *Plavka il'menitovykh kontsentratorov na bogaty titanovyy shlak* (Melting of ilmenite concentrates to rich titanium slag). *Izvestiya of Academy of Sciences of the USSR. Metallurgy = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals*. **1965**. 1. 82-87 (in Russ.).

7 *Issledovanie fiziko-khimicheskikh zakonov raspredeleniya metallov v usloviyakh besflyusovoi i s dobavleniem flyusov elektropлавки il'menitovykh kontsentratorov*. (Investigation of physico-chemical regularities of metal allocation in condition with and without flux electrosmelting of ilmenite con-

centrates). *Otchet o NIR. NTs NTI* (Scientific report). Almaty. **2012**. 62. Inv. No 0212RK00899 (in Russ.).

8 Sergeev V.V., Bezukladnikov A.B., Mal'shin V.M. *Metallurgiya titana*. (Metallurgy of titanium) Moscow: Metallurgy. **1979**. 263 (in Russ.).

9 Pavlov A.V., Shayakhmetov B.M., Onaev M.I., Shmidt E.V., Alybaev Zh.O. *O nauchno prakticheskikh aspektakh i rezervakh povysheniya tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei ekspluatatsii elektropечи bol'shoi moshchnosti po vyplavke vysokotitanistykh shlakov iz il'menitov*. (About scientific- practical aspects and increase of reserves of technical-economic indices of large facility electric furnace exploitation for high-titanium slags smelting from ilmenite). *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya = Complex Use of Mineral Resources*. **2001**. 6. 64-70 (in Russ.).

10 Baisanov S.O., Nurgali N.Z., Almagabetov M.S., Zhumagaliev E.K., Isin D.K. *Vybor vosstanovitelya dlya vyplavki bogatogo titanovogo shlaka iz kontsentratorov mestorozhdeniya Shokash*. (Choice of reductant for rich titanite slag smelting from Shokash deposit concentrates) *Sovremennyye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroeniya* (Modern methods of design and technology for metallurgical engineering). Mezhdun. sbornik nauchnykh trudov (International collection of science transactions). Magnitogorsk. MG TU. **2008**. 132-136 (in Russ.).

ТҮЙНЕМЕ

Кесекшелудің шарттары анықталды: материалдардың ұнтақтау дәрежесі -0,074 мм класы бойынша 70 %, байланыстырушының түрі және мөлшері - бентонитті балшық шоғыр массасынан 1 % мөлшерінде. Кесекшелердің беріктігі тығыздау кезіндегі қысымға байланысты, қысым 100-120 кг/см² аралығында болуы қажет. Сонымен қатар кесекшелердің беріктігі шихтаның ылғалдылығына және пластикалығына тәуелділігі анықталды. Қалған ылғалдылықтың 2-ден 1%-ға дейін төмендеуі кесекшелердің беріктігін екі есеге жоғарлатуға мүмкіндік береді, шихтаның біртектілігі оның пластикалығын жақсартады. Ильменитті шоғыр және тотықсыздандырғыштан құралған шихта кесекшелерін балқыту бойынша зерттеулер жүргізілді. Тотықсыздандырғыш ретінде коксты ұсақ, антрацит және Шұбаркөл көмірінен алынған жартылай кокс қолданылды. Тотықсыздандырғыштың тиімді шығыны анықталды: темір оксидтерін металға дейін тотықсыздандыруға қажетті мөлшердің коксты ұсақ және жартылай кокс үшін - 70 %, антрацит үшін - 90 %. Ильменитті шоғыр және коксты ұсақтан дайындалған кесекшелерді тотықсыздандырып балқыту кезінде алынған қождардың құрамында -84,9 % TiO₂ және 6,9 % FeO; антрацитпен балқытқанда - 85,6% TiO₂ және 6,1 % FeO; Шұбаркөл көмірінен алынған жартылай кокспен балқыту кезінде алынған қождардың құрамы - 86,0 % TiO₂ және 5,9 % FeO. Кесекшеленген шихтаны балқыту уақыты 1,5 сағатты құрады, балқыту температурасы 1600 °C. Титан құрамдас шикізатты өңдеу үшін коксты ұсақ және Шұбаркөл көмірінен алынған жартылай кокс сияқты арзан тотықсыздандырғышты қолдану ұсынылған.

Түйінді сөздер: электробалқыту, ильменитті шоғыр, кесекшелеу, титан оксиді, темір оксиді, титанды қож, шихта.

SUMMARY

The terms of briquetting were determined: degree of materials grinding - 70% for class -0.074 mm, type and quantity of binder - bentonite clay in the amount of 1% of the mass of the concentrate. The strength of briquets depends on pressure during pressing which should be around 100-120 kg/cm². It is found that briquette strength also depends on the moisture content and plasticity of the charge. Reduction of residual moisture from 2 to 1% can increase the strength of briquettes almost doubled, the homogeneity of blend improves its malleability. Research on smelting of briquette blend consisting of ilmenite concentrate and reductant. Coke breeze, anthracite and semi-coke derived from Shubarkol coal were used as reductant. The

optimum reductant consumption was determined: for coke breeze and semi-coke-70%, for anthracite - 90% from the quantity required to reduce iron oxides to the metal. At reduction smelting of briquettes consist of ilmenite concentrate and coke breeze slags, containing 84.9 % TiO_2 and 6.9% FeO were obtained, with anthracite - 85.6 % TiO_2 and 6.1 % FeO; with semi-coke from Shubark ol' coal - 86.0 % TiO_2 and 5.9 % FeO. The briquetted charge smelting time was 1.5 hours, smelting temperature - 1600°C. For the processing of titanium-bearing raw materials use such cheap reductants as coke breeze and semi-coke derived from Shubarkol coal are recommended.

Key words: electrosmelting, ilmenite concentrate, briquetting, titanium oxide, iron oxide, titanium slag, charge.

Поступила 23.02. 2015



УДК 669.246.046.46

Комплексное использование
минерального сырья. № 1. 2015

С. Б. САДЫКОВ¹, С. М. КОЖАХМЕТОВ^{2,3*}, С. А. КВЯТКОВСКИЙ²,
Т. С. САДЫКОВ³, А. Ф. ЧЕКИМБАЕВ⁴

¹ТОО «Ферроникелевый комбинат «Ертіс», Астана

²АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения», Алматы, *entc-sultan@mail.ru

³ТОО «Евразийский научно-технологический центр «Металлы и материалы», Алматы

⁴Филиал НЦ КПМС РК «Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева»,
Караганда

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННЫХ ШЛАКОВ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ШЛАКИ ПЛАВОК ОКИСЛЕННЫХ КОБАЛЬТ-НИКЕЛЕВЫХ РУД ГОРНОСТАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В статье представлены результаты лабораторных исследований свойств шлаков, моделирующих шлаки от переработки окисленных кобальт-никелевых руд (ОНР) Горностаевского месторождения в Восточном Казахстане с получением никельсодержащих штейнов и ферроникеля. Изучены свойства шлаков в области ранее определенных оптимальных составов, обеспечивающих наиболее полное разделение шлака, штейна и ферроникеля. Искусственные шлаки, соответствующие оптимальным составам, приготовленные из химически чистых реактивов, прокаленные при температуре 1000 °С до постоянного веса, были подвергнуты детальному экспериментальному изучению. Определены их вязкость, температура плавления и фазовые составы. Для определения вязкости опытных шлаков был выбран амплитудно-резонансный вариант метода вибрационной вискозиметрии. Экспериментально определены величины вязкости шлаков в зависимости от температуры. Вязкость шлаков в интервале 1500-1150 °С находилась в пределах 1,2-7,7 Па·с. Температура полного расплавления шлаков – в пределах 1470-1544 °С. Для определения температуры кристаллизации шлаков использовали метод полулогарифмической обработки политерм вязкости. Приведены уравнения для расчета фазового состава. Найдено, что фазовый состав шлаков представлен в основном геденбергитом, а также псевдоволластонитом, диопсидом и анортитом. Установлено, что в обоих шлаках доминирующей фазой является геденбергит (температура плавления 1230 °С), который и определяет температуру их плавления. Шлаки, моделирующие составы, полученные при переработке ОНР на ферроникель, содержат меньше оксида железа и имеют более высокую вязкость и температуру плавления, чем шлаки, моделирующие состав шлаков при получении никелевого штейна.

Ключевые слова: кобальт-никелевая руда, никельсодержащий штейн, ферроникель, шлак, никель, кобальт, вязкость шлака, температура плавления, фазовый состав.