

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

УДК 669.053

DOI: 10.14529/met160103

ВОЗМОЖНОСТИ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ ИЛЬМЕНИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Ю.А. Гудим¹, М. Акнурланулы², В.Е. Роцин²

¹ ПК «Технология металлов», г. Челябинск,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Оценены возможности пирометаллургического обогащения ильменитовых концентратов с целью получения высокотитанистых шлаков. Проведены лабораторные эксперименты по различным технологическим вариантам, которые подтвердили возможность эффективного пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата при температуре расплава 1600...1650 °С. Могут быть использованы схемы одностадийного и двухстадийного процессов пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата. Схема одностадийного процесса требует меньших капитальных затрат. При обогащении бедного концентрата ($TiO_2 \leq 46\%$) предпочтительна схема ведения процесса без добавок флюсов с оставлением в шлаке 12...15 % оксидов железа. При использовании более богатых концентратов ($TiO_2 \geq 55\%$) может быть использована схема процесса с добавкой в состав шихты извести и кальцинированной соды и более полным восстановлением железа при содержании FeO в шлаке 3...4 %. Преимуществами двухстадийного процесса являются легкость контроля и регулирования процесса плавки и возможность использования менее квалифицированного персонала. Рекомендованы технологические схемы по пирометаллургическому обогащению ильменитовых концентратов. Оценены возможности осуществления производства высокотитанистых шлаков в агрегате МАГМА-3.

Ключевые слова: ильменитовый концентрат; пирометаллургическое обогащение; высокотитанистый шлак; чугуны; флюсы; технологическая схема; агрегат МАГМА-3.

Введение

Ильменитовые руды, основным минералом которых является ильменит $FeO \cdot TiO_2$, обычно подвергают обогащению магнитным способом. В результате получают концентраты, содержащие 45...55 % TiO_2 и до 50 % оксидов железа. Содержание оксидов кремния и алюминия в концентратах не превышает в сумме 4...5 %.

Вследствие низкого содержания оксида титана и высокого содержания оксидов железа концентраты такого состава неудобны для получения технического диоксида титана TiO_2 и продуктов его переработки – губчатого и металлического титана. Известны способы получения высокотитанистого продукта путем обработки ильменитового концентрата серной или соляной кислотой [1, 2]. Использование такого способа ограничено малым спросом на хлорное и серноокисное железо, получаемых в качестве побочных продуктов. Поэтому основным способом получения высокотитанистого продукта из ильменитовых концентратов для последующего производства титана является способ пирометаллургического обогащения. Известны два способа пирометаллургического обогащения.

Одностадийный процесс

Сущность способа заключается в расплавлении ильменитового концентрата и восстановлении оксидов железа углеродом. Восстановить оксиды железа, входящие в состав ильменитового расплава относительно легко, но по мере снижения содержания оксидов железа быстро повышается температура плавления шлаковой фазы – с 1400 °С для ильменита до 1840 °С для оксида титана TiO_2 [3].

При содержании в шлаке 15...20 % FeO температура плавления шлака еще составляет 1450...1500 °С, но при дальнейшем снижении содержания FeO температура плавления шлака резко возрастает. Соответственно возрастает вязкость шлакового расплава, а скорость и степень восстановления оксидов железа уменьшаются. Кроме того, возникают проблемы разделения высокотитанистого шлака и частиц восстановленного железа.

Поэтому для пирометаллургического обогащения ильменитовых концентратов обычно используют руднотермические дуговые ферросплавные печи, позволяющие повышать температуру расплава до 1850...1900 °С. Обычно такие печи работают периодическим процессом, и после окончания плавки из печи одновременно сливают металл (чугун с небольшим содержанием титана) и высокотитанистый шлак. После остывания застывшего металлошлакового конгломерата его дробят и размалывают, после чего чугун отделяют методом магнитной сепарации. Недостатками такого способа являются большой расход электроэнергии, низкая производительность плавильного агрегата и необходимость окомкования ильменитового концентрата, поскольку концентрат представляет собой дисперсный порошок. Необходимость окомкования концентрата требует дополнительных капитальных вложений.

Возможность использования других более экономичных плавильных агрегатов ограничена необходимостью вести процесс пирометаллургического обогащения при высоких температурах [4–6]. Выход может быть найден, если состав шла-

ковой фазы корректировать небольшими присадками флюсов, понижающих температуру плавления высокотитанистого шлакового продукта. Предварительный выбор вида флюсов может быть произведен с использованием диаграмм состояния шлаковых систем. Граничными условиями при выборе флюса должны быть температура плавления шлаковой фазы после присадки флюса (не более 1650 °С) и максимально допустимое содержание компонента флюса в титанистом шлаке (не более 15 %).

Максимальное снижение температуры плавления высокотитанистого шлака достигается добавками оксидов щелочных металлов. При содержании в шлаке 10 % K_2O или Na_2O и 90 % TiO_2 температура его плавления составляет примерно 1000 °С. Температуру плавления высокотитанистого шлака снижают также добавки оксидов щелочноземельных металлов. При содержании 15 % CaO и 85 % TiO_2 температура плавления шлака составляет 1600 °С, а при 20 % CaO – 1475 °С. При составе 10 % MgO и 90 % TiO_2 температура плавления шлака порядка 1650 °С.

Приведенные сведения позволяют предложить приемлемые способы снижения температуры плавления и, соответственно, уменьшения вязкости шлаков при температуре процесса пирометаллургического обогащения:

- проведение пирометаллургического обогащения концентрата с недостатком углеродистого восстановителя и получением титанистых шлаков, содержащих до 10...15 % оксида железа;
- добавление в шлак кальцинированной соды (Na_2CO_3) из расчета получения в шлаке 5...6 % Na_2O ;
- добавление в шлак оксида кальция CaO из расчета получения в шлаке 10 % CaO ;
- добавка в шлак оксида кальция и кальцинированной соды на получение в шлаке 2...3 % Na_2O и 5...7 % CaO .

Следует, однако, отметить, что проведение процесса пирометаллургического обогащения с добавками в состав шихты флюсов, снижающих температуру шлака, хотя и облегчает процессы восстановления железа и разделения продуктов плавки, но неизбежно увеличивает количество получаемого шлака. Увеличение количества шлака снижает содержание оксидов титана в шлаке, что может увеличить затраты на передел высокотитанистого шлака в титановую губку.

Двухстадийный процесс

В последние годы предлагается двухстадийный процесс пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата. Первой стадией такого процесса является твердофазное восстановление углеродом угля при температуре 1200–1300 °С [7–9].

Для осуществления твердофазного восстановления на первой стадии могут быть использованы шахтные или вращающиеся наклонно установленные цилиндрические печи. В первом случае необходимо использовать окомкованную шихту, состоящую из концентрата, флюсующих добавок и,

возможно, твердого углеродистого восстановителя. Операция окомковывания шихты удорожает и усложняет процесс.

Второй стадией процесса является разделение восстановленной металлической фазы (обычно чугуна) и высокотитанистого шлака путем расплавления металлизированных продуктов первой стадии и нагрева расплава до необходимой температуры. В качестве плавильного агрегата в таком случае могут использоваться руднотермические печи, дуговые сталеплавильные печи с проплавлением продуктов в жидкой ванне, а также высокотемпературные топливно-кислородные плавильные агрегаты. Для разделения продуктов твердофазного восстановления железа путем плавления и перегрева расплава также целесообразно получать высокотитанистые шлаки с пониженной (не более 1650 °С) температурой плавления теми же способами, что и при использовании одностадийного процесса.

Целью данной работы является сравнение эффективности разных методов пирометаллургического обогащения ильменитовых концентратов на основании лабораторных экспериментов.

Методика исследования

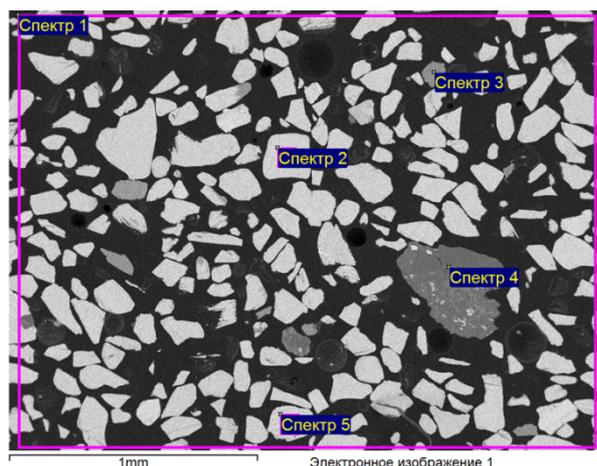
В экспериментах использовали ильменитовый концентрат, вид и состав фаз которого приведен на рис. 1. Средний состав концентрата приведен в табл. 1.

Состав шихты варьировали в соответствии с диаграммами состояния бинарных систем $TiO_2-R_nO_m$. Концентрат смешивали с необходимым (расчетным) количеством флюсов и кокса. Использовали концентрат, состав которого приведен в табл. 1 и металлургический кокс производства Челябинского металлургического комбината с содержанием золы 10...12 %.

Смешанную шихту засыпали в графитовый тигель, который затем помещали в печь Таммана. В процессе плавления шихты и нагрева расплава температуру контролировали термодарой погружения. Нагрев расплава производили до температуры выше 1500 °С и получения жидкоподвижного шлака. Затем печь выключали, извлекали тигель с расплавленными шлаком и чугуном, а после охлаждения до комнатной температуры извлекали из тигля шлак и чугун. Если извлечь из тигля продукты плавки не удалось, тигель разбивали, отделяли от него кусочки шлака и металла. Затем для составления материального баланса отдельно определяли массу шлака и металла.

Образцы шлака и металла использовали для изготовления микрошлифов, на которых изучали состав и структуру полученных продуктов плавки. Электронномикроскопический анализ образцов проводили на растровом микроскопе Joel JSM7001F с использованием энергодисперсионного детектора Oxford INCA X-max 80.

Результаты изучения состава и структуры продуктов плавки использовали для корректировки



	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
1	47	0,6	0,3	3,6	0,1	21,3	0,5	26,8
2	37	0,2	0,1	0,0	0,0	25,6	0,9	36,1
3	46	11,1	0,4	23,0	0,4	0,2	0,6	18,3
4	55	0,0	0,0	44,7	0,0	0,0	0,0	0,3
5	38	1,0	0,1	0,0	0,0	23,0	0,3	37,9

Рис. 1. Вид и состав фаз (мас. %) в точках анализа исходного ильменитового концентрата

Таблица 1
Средний состав (мас. %) концентрата

Компонент	Содержание	Среднее
TiO ₂	45,0...47,0	46,20
Fe ₂ O ₃	14,0...18,0	16,45
FeO	33,0...35,0	34,20
Al ₂ O ₃	0,600	0,420
SiO ₂	< 01,00	0,890
P ₂ O ₅	< 0,030	0,015
V ₂ O ₅	< 0,300	0,240
Cr ₂ O ₃	< 0,070	0,058
U (ppm)	< 15	6
Th (ppm)	< 25	10

состава шихты последующих плавов и разработки рекомендаций по рациональным технологическим схемам промышленного пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата.

Провели 16 опытных плавов. По технологическим параметрам проведенные экспериментальные плавки можно условно разделить на 7 групп (табл. 2).

Группа I, эксперименты № 1, 2. Шихта состояла из ильменитового концентрата и кокса. Количество кокса превышало расчетное на 10...15 % с целью возможно более полного восстановления железа. Температуру процесса варьировали в пределах 1600...1750 °С.

Группа II, эксперименты № 3, 4, 5, 7, 8. Шихта состояла из ильменитового концентрата, извести, кокса. Количество извести составляло 13,5...14,0 % от массы концентрата. Количество кокса составляло 3,8...7,5 % от массы концентрата. Температуру процесса варьировали в пределах 1450...1800 °С.

Группа III, эксперимент № 6. Шихту составляли из ильменитового концентрата, извести, периклаза и кокса. Количество извести составляло 6,5 %, периклаза (MgO) – 6,5 %. кокса – 7 % от массы концентрата. Температура процесса 1600 °С.

Группа IV, эксперименты № 9, 10. Шихта – ильменитовый концентрат. Восстановление железа происходило за счет углерода графитового тигля. В этих экспериментах часть железа концентрата осталась в шлаке в виде оксидов железа.

Группа V, эксперимент № 11. Шихту составляли из ильменитового концентрата, кальцинированной соды Na₂CO₃ и кокса. Количество соды 12 % от массы концентрата, кокса 6 % от массы концентрата. Температура конца плавки 1300 °С. Шлак был жидкоподвижным.

Группа VI, эксперименты № 12, 13, 14. Шихту составляли из ильменитового концентрата, извести, кальцинированной соды, кокса. Количество извести 10...15 %, кальцинированной соды 5...10 %, кокса 6...13 % от массы концентрата. Температура конца плавки 1360...1500 °С.

Группа VII, эксперименты № 15, 16. На плавке № 15 осуществили твердофазное восстановление железа концентрата коксом в присутствии извести (10 % от массы концентрата) при 1250 °С в течение 1,5 часов. На плавке № 16 полученную губку расплавили в графитовом тигле. В конце эксперимента температура шлакового расплава была 1600 °С.

Варианты выполненных экспериментов

Группа exper.	№ exper.	Расход кокса, %	Вид и количество флюса, %	Температура, °С	Примечания
I	1, 2	7	–	1600...1750	Вынос извести
II	3, 4, 5, 7, 8	3,8...7,5	13,5...14,0 CaO	1450...1800	Вспенивания шлака, образования корки
III	6	7	6,5 % CaO, 6,5 % MgO	1600	Загустевшая масса
IV	9, 10	–	–	1500...1570	Разливка
V	11	6	12 % NaCO ₃	1300	Жидкотекучий расплав
VI	12, 13, 14	6...13	10...15 % CaO, 5...10 % NaO ₃	1360...1500	Разливка
VII	15	7	10 % CaO	1250	Изотермическая выдержка
	16	–	–	1600	Остатки металла и шлака в тигле

Результаты экспериментов

На плавках группы 1, проведенных без добавок флюсов с избытком восстановителя при достаточно высоких температурах, не удалось обеспечить необходимое разделение полученных продуктов пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата – чугуна и высокотитанистого шлака вследствие высокой вязкости шлака. Мелкие корольки восстановленного железа не опустились из объема шлака в нижнюю часть тигля и остались в шлаке, равномерно распределившись в его объеме. Отмагнитить размолотый шлак с целью извлечения восстановленного металла не удалось, так как мелкие частицы металла были прочно сцеплены со шлаком.

Полученный чугун имел следующий состав (мас. %):

C	Si	Ti	Fe
3,50	0,15	0,25	96,20

Анализ шлаков не производили вследствие большого количества в объеме шлака мелких металлических частиц. Повышенная вязкость шлака обусловлена, по-видимому, наличием тугоплавких карбидов титана.

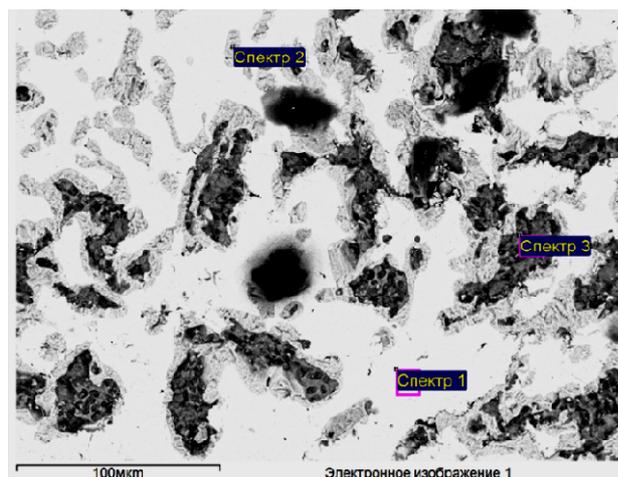
Результаты плавки 1 и 2 говорят о нецелесообразности использования этого технологического варианта для обогащения ильменитового концентрата.

На плавках группы 2, при проведении которых в шихту добавляли известь для уменьшения температуры плавления высокотитанистого шлака и варьировали количество восстановителя – кокса, получены следующие результаты. При сравнительно низкой температуре процесса 1500...1600 °С (эксперименты № 4 и 5) независимо от количества использованного восстановителя содержание оксидов титана в получаемом шлаке не достигало необходимых значений (70 % и выше). Состав чугуна был традиционным для агрегатов, использующих процесс жидкофазного восстановления.

Причиной неполного восстановления оксидов железа и высокого их содержания в конечном шлаке была, по-видимому, малая скорость реакции восстановления вследствие низких температур и высокой вязкости шлака. Повышенное содержание оксида кальция в шлаке также вызывало снижение концентрации оксидов титана в конечном шлаке.

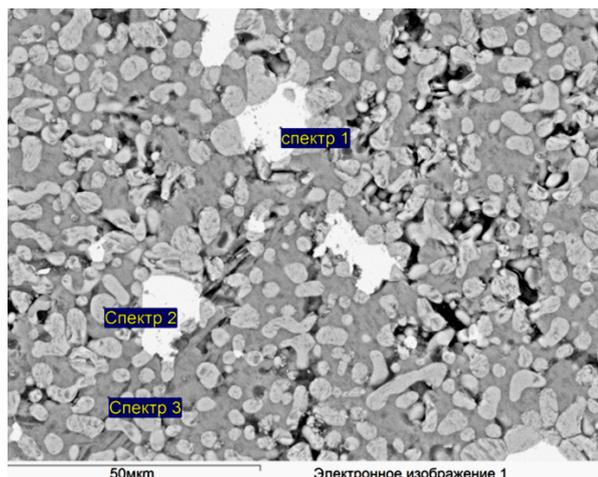
При высокой температуре процесса 1700...1800 °С (эксперименты № 7 и 8) чугун имел повышенное содержание кремния и содержал большое количество карбидов титана (рис. 2), а также карбид кальция. Причиной этого была высокая температура процесса высокотемпературного обогащения. Шлак, полученный в результате высокотемпературных экспериментов с добавками в шихту извести CaO, содержал большое количество титана в виде карбида титана TiC и соединений типа CaO·TiO₂ и мало оксидов железа. В шлаке присутствовало некоторое количество карбида кальция CaC₂. При охлаждении шлака часть карбида кальция разлагалась с выделением ацетилена, о чем свидетельствовал характерный запах. Даже при температуре 1800 °С шлак был очень вязким и разделение продуктов плавки было затруднено. Вследствие этого процесс с добавлением в шихту 13...14 % оксида кальция от массы концентрата не подходит для реализации в топливо-кислородном плавильном агрегате. Увеличение количества вводимой в шихту извести до 20 % приводит к излишнему разбавлению шлака и снижению в нем концентрации оксидов титана.

К третьей группе экспериментов относится плавка № 6, на которой в состав шихты для уменьшения температуры плавления конечного шлака вводили оксид кальция CaO и периклаза MgO, имитируя добавку доломита. При конечной температуре расплава 1600 °С полученный шлак был вязким, полностью разделить металл и шлак не удалось, так как весь металл находился в шлаке в виде мелких корольков, не опустившихся на дно тигля.



	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
1	4	0	0,0	0,1	1,9	0,1	0,3	0,6	91,0
2	15	11,8	0,0	0,0	0,2	0,1	70,5	0,0	2,5
3	7	53,8	0,9	1,8	0,6	33,6	0,4	0,0	1,6

а)



	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
1	12	7,9	0,0	0,1	0,0	1,4	78,7	0,0	0,3
2	0	41,7	0,2	0,9	0,2	26,3	30,3	0,0	0,2
3	3	0	0,0	0,1	2,3	0,4	4,2	3,3	82,5

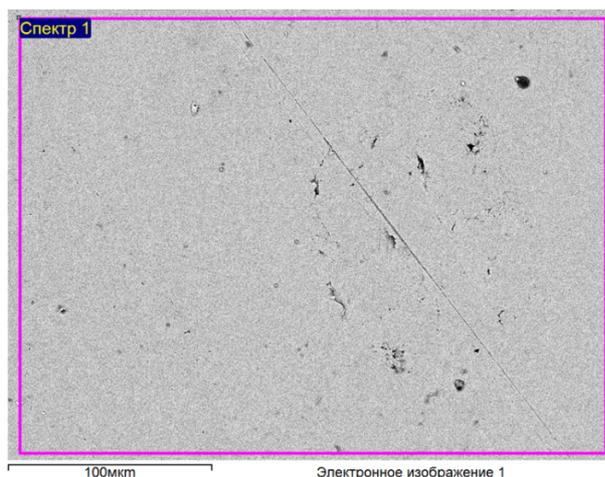
б)

Рис. 2. Структура и состав (мас. %) чугуна (а) и шлака (б), полученных в эксперименте № 8

При проведении четвертой группы экспериментов процесс пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата вели без добавок флюсов, существенно ограничив количество углеродистого восстановителя с целью получения конечного шлака, содержащего 12...15 % оксидов железа и имеющего невысокую температуру плавления (плавки № 9 и 10). На плавке № 9 с температурой расплава 1580 °С были получены чугун и шлак с высоким содержанием оксидов титана (78...80 %) и повышенным содержанием оксидов

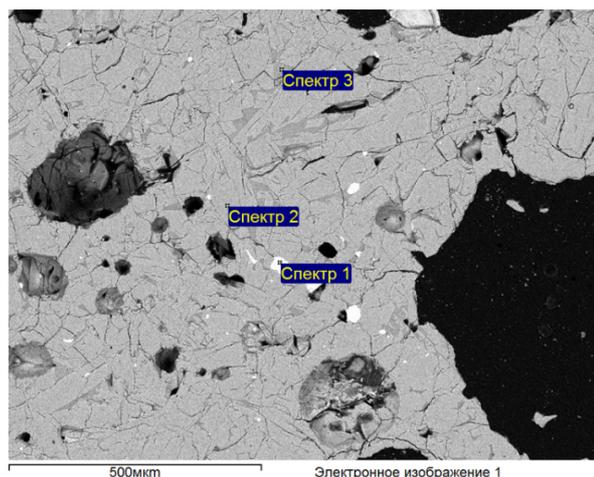
железа (рис. 3). Содержание титана пересчитывали на содержание TiO_2 , содержание железа на содержание FeO . Металл и шлак легко разделились, металл получен в виде слиточка.

На плавке № 10, на которой температура расплава была ниже (1500 °С), железо из ильменитового концентрата восстановилось менее полно, содержание оксидов железа в конечном шлаке было высоким, содержание оксидов титана ниже 70 %. Причиной этого была меньшая скорость восстановления железа вследствие более



	C	Al	Si	Ti	Mn	Fe
1	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	94,0

а)



	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
1	3,0	0	0,1	0,0	0,0	0,1	1,2	0,1	90,2
2	0	41,7	0,8	1,4	0,1	0,0	48,1	0,5	7,4
3	5	44,9	0,5	3,7	15,5	2,9	9,0	5,9	12,7

б)

Рис. 3. Структура и состав (мас. %) чугуна (а) и шлака (б), полученных в эксперименте № 9

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

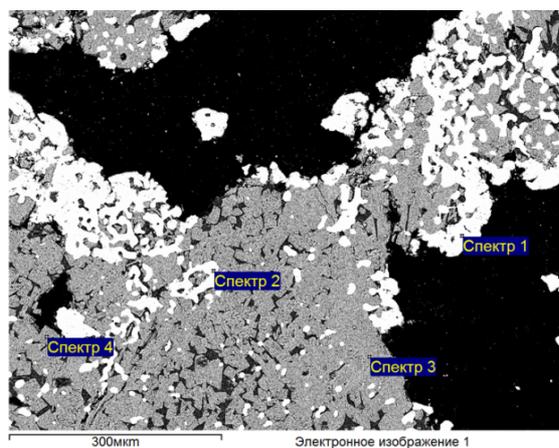
низкой температуры процесса и большей вязкости шлака.

Результаты, полученные на плавке № 9, свидетельствуют о возможности получения высокотитанистого шлака с содержанием оксидов титана более 75 % при пирометаллургическом обогащении ильменитового концентрата без добавок флюсов при условии ограничения количества восстановителя и ведении процесса при температуре расплава 1600...1650 °С.

Эксперимент пятой группы (плавка № 11) проводили с целью проверки влияния добавок Na_2O на температуру плавления и вязкость шлака. Для этого в состав шихты кроме концентрата вве-

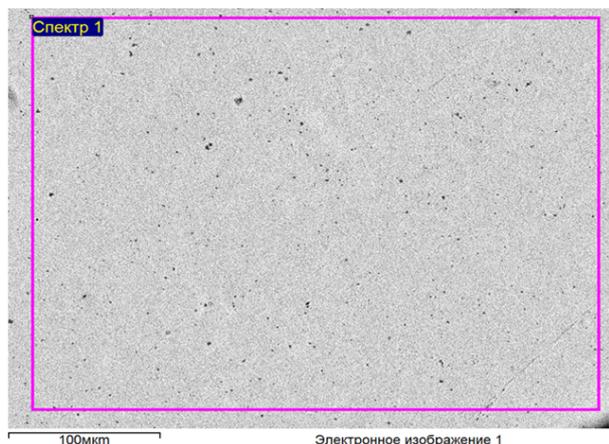
ли кальцинированную соду Na_2CO_3 в количестве 10 % от массы концентрата и уменьшили количество восстановителя. Плавку закончили при температуре 1300 °С. Шлак был жидкоподвижным, металл и шлак легко разделились. Вследствие низкой температуры процесс восстановления железа прошел не полностью, содержание оксидов железа в шлаке было высоким (26 %), соответственно содержание оксидов титана низким (58 %).

В шестой группе экспериментов (плавки № 12, 13 и 14) в состав шихты вводили флюсы, снижающие температуру плавления высокотитанистого шлака: кальцинированную соду Na_2CO_3 и оксид кальция CaO . Количество соды меняли в



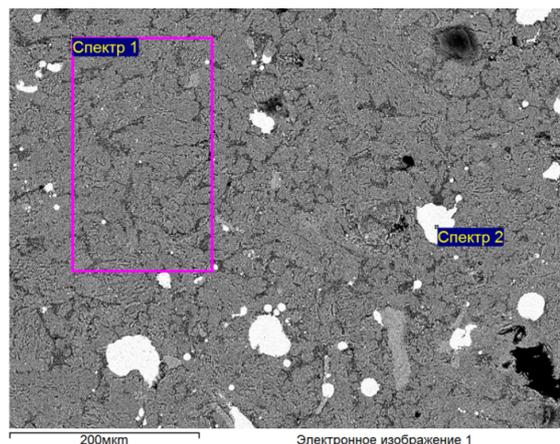
	O	Mg	Si	S	Ca	Ti	Fe
1	0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,4	99,4
2	0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	98,6
3	41	1,5	0,1	0,0	0,4	56,0	0,6
4	43	0,1	0,6	0,0	24,8	30,3	1,4

а)



Элементы	C	Si	S	Ti	Fe
Спектр 1	4	0,7	0,0	0,5	94,8

б)



	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe
1	41	0,7	0,5	2,4	0,0	13,7	41,2	0,6
2	0	0,1	0,0	0,5	0,0	0,1	0,6	98,6

в)

Рис. 4. Вид и состав (мас. %) продуктов твердофазного восстановления, металла и шлака, полученных после расплавления продукта твердофазного восстановления в эксперименте № 15

пределах 5...10 % от массы концентрата, количество оксида кальция меняли в пределах 10...15 %. На всех плавках этой группы железо было восстановлено почти полностью. Несмотря на это, благодаря наличию оксидов натрия и кальция шлак был жидкоподвижным, шлак и металл хорошо отделились друг от друга. В шлаке не наблюдали корольков металла. Но вследствие высокого содержания оксидов натрия и кальция, разбавлявших шлак, концентрация оксидов титана в конечном шлаке была сравнительно невысокой (58...67 %). Поэтому процесс пирометаллургического обогащения по схеме, опробованной в экспериментах 12, 13 и 14, не может быть эффективно реализован, хотя в таком процессе привлекает возможность работы при сравнительно невысоких (1500...1550 °С) температурах. Подобный процесс может быть применен в случае использования более богатых (54...56 %) концентратов.

Седьмую группу экспериментов проводили с целью изучения целесообразности использования двухстадийного процесса пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата. В эксперименте № 15 спрессованную шихту, содержащую концентрат, оксид кальция (10 % от массы концентрата) и кокс (13 % от массы концентрата), нагрели до 1250 °С, выдержали при этой температуре 1,5 часа и охладили. Состав полученной губки показан на рис. 4, а. Характерно наличие восстановленного железа с относительно высоким содержанием титана и шлаковых фаз с высоким содержанием оксида титана, не содержащих оксид кальция, и фаз с высоким содержанием оксида кальция и низким содержанием TiO_2 , возможно соединений типа $CaO \cdot TiO_2$.

После расплавления полученной губки в графитовом тигле при температуре 1600 °С удалось разделить металлическую и шлаковую фазы. Для полученного металла характерно повышенное содержание кремния и титана (рис. 4, б). В шлаке, полученном после расплавления губки, наблюдается большое количество включений металлической фазы (корольков) вследствие относительно высокой вязкости шлака (рис. 4, в). Содержание оксидов титана в шлаке относительно низкое (41,2 %) при низком содержании оксидов железа вследствие высокого (13,7 %) содержания оксида кальция.

Возможно, показатели двухстадийного процесса можно улучшить, повысив температуру расплава после расплавления губки до 1650...1700 °С и несколько уменьшив количество оксида кальция в шихте.

Оценка результатов проведенных экспериментов

Результаты проведенных экспериментов подтвердили возможность эффективного пирометаллургического обогащения ильменитового концен-

трата при температуре расплава 1600...1650 °С. Могут быть использованы схемы одностадийного и двухстадийного процессов пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата. Схема одностадийного процесса требует меньших капитальных затрат. При обогащении бедного концентрата ($TiO_2 \leq 46 \%$) предпочтительна схема ведения процесса без добавок флюсов с оставлением в шлаке 12...15 % оксидов железа. При использовании более богатых концентратов ($TiO_2 \geq 55 \%$) может быть использована схема процесса с добавкой в состав шихты извести и кальцинированной соды и более полным восстановлением железа при содержании FeO в шлаке 3...4 %.

При наличии необходимых инвестиций может быть использована схема двухстадийного процесса, преимуществами которой являются легкость контроля и регулирования процесса плавки и возможность использования менее квалифицированного персонала по сравнению с работой одностадийным процессом.

Для осуществления процесса пирометаллургического обогащения ильменитовых концентратов может быть эффективно использован многоцелевой гарнисажный топливо-кислородный плавильный агрегат непрерывного действия МАГМА-3, разработанный компанией «Технология металлов» совместно с рядом ведущих конструкторских фирм России [11]. Агрегат МАГМА-3 способен переработать до 70 000 т шихтовых материалов в год и обладает значительно большими технологическими возможностями по сравнению с традиционными плавильными агрегатами.

Проведенные эксперименты по опробованию различных схем пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата, анализ полученных результатов и имеющихся литературных данных позволяют рекомендовать две эффективные технологические схемы пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата с использованием плавильного агрегата МАГМА.

1. Обогащение ильменитового концентрата без добавок флюсов, понижающих температуру плавления шлака с высоким содержанием оксидов титана.

В таком случае используемая шихта должна состоять из ильменитового концентрата и угля, используемого в качестве топлива и восстановителя железа. Чтобы температура плавления получаемого высокотитанистого шлака не превышала 1600...1650 °С, в конечном шлаке необходимо иметь содержание оксидов железа на уровне 10...12 %, то есть надо вести процесс с неполным восстановлением железа. Это учитывается расчетом необходимого количества углеродистого восстановителя. Получаемые в результате пирометаллургического обогащения чугуны и шлак с высоким (до 80 %) содержанием оксидов титана периодически сливаются из плавильного агрегата

через металлическую и шлаковую летку. Отработавшие газы удаляются из плавильной камеры в систему газоудаления и утилизации тепла отходящих газов, где производится дожигание СО, получение пара высоких параметров в энергетическом котле для выработки электроэнергии и очистка газов от пыли и кислотных оксидов. Согласно расчетам получаемой электроэнергии будет достаточно для производства кислорода и обслуживания технологического оборудования предприятия. Часть полученной электроэнергии может быть реализована на сторону.

II. Обогащение ильменитового концентрата с добавками флюсов, снижающих температуру плавления шлака с высоким содержанием оксидов титана.

В таком случае перерабатываемая в агрегате МАГМА-3 шихта состоит из ильменитового концентрата, извести, небольшого количества кальцинированной соды и угля, используемого в качестве топлива и восстановителя железа. Для получения высокотитанистого шлака с температурой плавления не выше 1600...1650 °С не потребуется иметь повышенное содержание оксидов железа в шлаке, содержание оксида железа в шлаке можно будет поддерживать на уровне 3...5 % и ниже. Продуктами пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата также будут чугун и шлак с высоким содержанием оксидов титана.

При использовании такого варианта количество получаемого чугуна несколько больше, чем при работе по первой схеме, но масса оксидов титана в шлаке будет такой же, а концентрация оксидов титана несколько ниже. Остальные показатели процесса не будут существенно отличаться от показателей процесса при использовании первой технологической схемы. Это подтверждается результатами проведенных лабораторных экспериментов и расчетами материального и тепловых балансов процесса.

Выводы

1. В лабораторных условиях опробованы различные технологические варианты пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата, исследованы количество и состав получаемых продуктов обогащения.

2. Определены рациональные варианты одностадийного процесса обогащения ильменитового концентрата применительно к топливо-кислородному плавильному агрегату.

3. В качестве основного рекомендован вариант пирометаллургического обогащения ильмени-

тового концентрата без добавок флюсов путем восстановления железа из оксидов углеродом при температуре 1600...1650 °С.

4. Опробована схема двухстадийного процесса пирометаллургического обогащения ильменитового концентрата и оценены перспективы ее промышленного использования.

Литература

1. Гудима, Н.В. *Краткий справочник по металлургии цветных металлов* / Н.В. Гудима, Я.П. Шейн. – М.: *Металлургия*. 1975. – 536 с.

2. Уткин Н. И. *Производство цветных металлов*. – М.: *Интермет Инжиниринг*. 2004. – 442 с.

3. *Атлас шлаков. Справочное издание: пер. с нем.* – М.: *Металлургия*. 1985. – 208 с.

4. *Процесс Ромелт* / под ред. В.А. Роменца. – М.: *МИСИС. Издат. дом «Руда и металлы»*, 2005. – 400 с.

5. *Плавка в жидкой ванне* / под ред. А.В. Ваникова. – М.: *Металлургия*, 1986. – 384 с.

6. Вольхин, А.И. *Черновая медь и серная кислота: в 2 т.* / А.И. Вольхин, Е.И. Елисеев, В.П. Жуков. – Челябинск: *Челябинское полиграфическое объединение «Книга»*. 2004. – Т. 2. – 378 с.

7. *Термодинамический анализ химических превращений при твердофазной металлзации титаномагнетитовых концентратов* / А.В. Асанов, В.Е. Роцин, А.В. Сенин, А.В. Роцин // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2010. – № 4. – С. 12–15.

8. Асанов, А.В. *Термодинамический анализ процессов в расплавах продуктов твердофазного восстановления ильменитовых концентратов* / А.В. Асанов, А.В. Сенин, В.Е. Роцин // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2010. – № 8. – С. 3–6.

9. Роцин, В.Е. *Возможности двухстадийной переработки концентратов титаномагнетитовых руд* / В.Е. Роцин, А.В. Асанов, А.В. Роцин // *Электрометаллургия*. – 2010. – № 6. – С. 15–25.

10. Асанов, А.В. *Твердофазная металлзация железо-ванадиевых концентратов и жидкофазное разделение продуктов их восстановления* / А.В. Асанов, В.Е. Роцин, А.В. Роцин // *Металлы*. – 2010. – № 6. – С. 35–38.

11. Гудим, Ю.А. *Топливо-кислородный плавильный агрегат непрерывного действия. его применение в металлургии и для утилизации отходов* / Ю.А. Гудим, А.А. Голубев, И.Ю. Зинуров // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2008. – Вып. 11, № 24. – С. 16–23.

Гудим Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, ПК «Технология металлов», г. Челябинск; kontakt-ru@technologiya-metallorv.com.

Акнурланулы Мейржан, магистрант кафедры металлургии и литейного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; aknurlanuly@bk.ru.

Рощин Василий Ефимович, д-р техн. наук, профессор кафедры металлургии и литейного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; roshchinve@susu.ru.

Поступила в редакцию 10 августа 2015 г.

DOI: 10.14529/met160103

OPPORTUNITIES OF PYROMETALLURGICAL ENRICHMENT OF ILMENITE CONCENTRATE

Yu.A. Gudim¹, kontakt-ru@technologiya-metallorv.com,

M. Aknurlanuly², aknurlanuly@bk.ru,

V.E. Roshchin², roshchinve@susu.ru

¹ Industrial Company "Technologiya Metallorv", Chelyabinsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper estimates opportunities of pyrometallurgical enrichment of ilmenite concentrates with the aim of obtaining high-titanium slags. Laboratory experiments were carried out in different technological variants. They confirmed the possibility of effective pyrometallurgical enrichment of the ilmenite concentrate at melt temperatures of 1600...1650 °C. One- and two-stage schemes of enrichment can be used. One-stage scheme requires less capital investment. When the concentrate is poor ($\text{TiO}_2 \leq 46\%$), it is preferable not to use flux additives and to retain 12...15 % of iron oxides in the slag. For rich concentrates ($\text{TiO}_2 \geq 55\%$) lime and soda ash may be added to the charge to achieve a higher degree of iron reduction (3...4 % FeO in the slag). The advantages of the two-stage process, on the other hand, consist in simplicity of melting control and regulation, as well as in the possibility of using less qualified personnel. Technological schemes for pyrometallurgical enrichment of pyrometallurgical concentrates are finally proposed and the possibility of the production of high-titanium slags using the MAGMA-3 aggregate is estimated.

Keywords: ilmenite concentrate; pyrometallurgical enrichment; high-titanium slag; cast iron; flux; technological scheme; MAGMA-3 aggregate.

References

1. Gudima N.V., Sheyn Ya.P. *Kratkiy spravochnik po metallurgii tsvetnykh metallov* [Quick Reference to Non-Ferrous Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 536 p.
2. Utkin N.I. *Proizvodstvo tsvetnykh metallov* [Production of Non-Ferrous Metals]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2004. 442 p.
3. *Schlackenatlas*. Düsseldorf, Verlag Stahleisen m.b.H., 1981.
4. *Protsess Romelt* [Process Romelt]. Romenets V.A. (Ed.). Moscow, Ruda i metally Publ., 2005. 400 p.
5. *Plavka v zhidkoy vanne* [Melting in a Liquid Bath]. Vanyukov A.V. (Ed.). Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 384 p.
6. Vol'khin A.I., Eliseev E.I., Zhukov V.P. *Chernovaya med' i sernaya kislota*. T. 2. [Blister Copper and Sulfuric Acid. Pt. II.]. Chelyabinsk, Kniga Publ., 2004. 378 p.
7. Asanov A.V., Roshchin V.E., Senin A.V., Roshchin A.V. Thermodynamic Analysis of Chemical Transformation in the Solid-Phase Reduction of Titanium-Magnetite Concentrates. *Steel in Translation*, 2010, vol. 40, no. 4, pp. 314–317. DOI: 10.3103/S0967091210040030
8. Asanov A.V., Roshchin V.E., Senin A.V., Roshchin A.V. Processes in Melts of Solid-Phase Reduction Products of Ilmenite Concentrates. *Steel in Translation*, 2010, vol. 40, no. 8, pp. 695–698. DOI: 10.3103/S0967091210080012
9. Roshchin V.E., Asanov A.V., Roshchin A.V. [Features a Two-Step Processing of Titanomagnetite Ore Concentrates]. *Elektrometallurgiya*, 2010, no. 6, pp. 15–25. (in Russ.)

10. Asanov A.V., Roshchin V.E., Roshchin A.V. [Solid-Plating Iron-Vanadium Concentrates and Liquid Phase Separation of the Products of Their Recovery]. *Metally*, 2010, no. 6, pp. 35–38. (in Russ.)

11. Gudim Yu.A., Golubev A.A., Zinurov I.Yu. [Fuel-Oxygen Melting Unit of Continuous Action. Its Application in Industry and Waste Disposal]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2008, no. 24 (124), issue 11, pp. 16–23. (in Russ.)

Received 10 August 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гудим, Ю.А. Возможности пирометаллургического обогащения ильменитовых концентратов / Ю.А. Гудим, М. Акнурланулы, В.Е. Рошин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 23–32. DOI: 10.14529/met160103

FOR CITATION

Gudim Yu.A., Aknurlanuly M., Roshchin V.E. Opportunities of Pyrometallurgical Enrichment of Ilmenite Concentrate. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 23–32. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160103
