

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ В АГРЕГАТЕ СЭР

И. А. РЫБЕНКО, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования; В. П. ЦЫМБАЛ, д-р техн. наук; П. А. СЕЧЕНОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования (Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, г. Новокузнецк)

Аннотация. В существующих технологических схемах для выделения оксидов титана в шлаковую фазу применяют электродуговые печи. Предложена более дешевая безотходная технология переработки титанового концентрата на основе непрерывного металлургического процесса и агрегата струйно-эмульсионного типа (СЭР). Рассмотрены технологические особенности нового непрерывного металлургического процесса СЭР: создание большой реакционной поверхности с последующей организацией вынужденного движения образовавшейся газовой взвеси под давлением; реализация принципа газодинамического запираания выходного канала в разработанном на основе этой идеи реакторе-осцилляторе; создание неравновесного стационарного колебательного режима на заданном уровне давления; нижняя подача подготовленной в реакторе-осцилляторе двухфазной рабочей смеси в вертикальный колонный реактор. Обоснована возможность реализации безотходной технологии переработки титаномagnetитовых концентратов, обеспечивающей одновременно с выплавкой природно-легированного металла получение товарного титанистого шлака. Показана принципиальная возможность реализации в агрегате типа СЭР технологии практически полного разделения железо- и титансодержащей составляющих титаномagnetитового концентрата с получением титанистого шлака с содержанием Ti_2O_5 46 % и более. Определен оптимальный расход материалов для полного восстановления железа и перевода оксидов титана в шлак без образования карбидов.

Ключевые слова: процесс и агрегат струйно-эмульсионного типа, переработка титаномagnetитовых концентратов, природно-легированная сталь, титанистый шлак.

Ссылка для цитирования: Рыбенко И.А., Цымбал В.П., Сеченов П.А. Разработка оптимальных режимов технологии переработки титаномagnetитовых концентратов в агрегате СЭР // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2022. Т. 78. № 1. С. 25-32.

Doi: 10.32339/0135-5910-2022-1-25-32

DEVELOPMENT OF OPTIMUM TECHNOLOGY REGIMES FOR PROCESSING TITANOMAGNETITE CONCENTRATES IN THE JEP UNIT

I. A. RYBENKO, HD (Tech.), Associate Professor, Head of Applied Information Technology and Programming Department; V. P. TSYMBAL, HD (Tech.); P. A. SECHENOV, PhD (Tech.), Associate Professor of Applied Information Technology and Programming Department (Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk)

Annotation. For separation of titanium oxides into slag phase the electric arc furnaces are used in the existing technological schemes. A cheaper waste-free technology for processing titanium concentrate based on a continuous metallurgical jet-emulsion process (JEP) and unit was proposed. The following technological features of the new continuous metallurgical process JEP were considered: creation of a large reaction surface with subsequent organization of the forced movement of the formed gas suspension under pressure; implementation of the principle of gas-dynamic locking of the output channel in an oscillator reactor developed on the basis of this idea; creation of a non-equilibrium stationary oscillatory mode at a given pressure level; bottom supply of a two-phase working mixture prepared in an oscillator reactor to a vertical column reactor. The possibility of implementing a waste-free technology for processing titanomagnetite concentrates was substantiated, that simultaneously ensures the production of commercial titanium slag with smelting of the naturally alloyed metal. It was shown that the technology of almost complete separation of the iron-containing and titanium-containing components from titanium-magnetite concentrate is possible to implement in the JEP type unit in order to obtain the titanium slag with Ti_2O_5 content 46 % or more. The optimal consumption of materials was determined for complete reduction of iron and conversion of the titanium oxides into slag without formation of carbides.

Keywords: jet-emulsion process and unit, processing of titanium-magnetite concentrates, naturally alloyed steel, titanium slag.

For citation: Rybenko I.A., Tsybmal V.P., Sechenov P.A. Development of optimum technology regimes for processing titanomagnetite concentrates in the JEP unit. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2022, vol. 78, no. 1, pp. 25-32. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2022-1-25-32

Как правило, исходными материалами для производства титана служат руды и концентраты, содержащие диоксид титана и сравнительно небольшое количество примесей. В частности, это может быть рутиловый концентрат, получаемый при обогащении титановых руд. Однако запасы рутила в мире весьма ограничены, и чаще применяют так называемый синтетический рутил или титановый шлак, получаемые при переработке ильменитовых концентратов [1]. Для получения титанового шлака ильменитовый концентрат восстанавливают в электродуговой печи, при этом железо отделяется в металлическую фазу (чугун), а невосстановленные оксиды титана и примесей образуют шлаковую фазу. Богатый шлак перерабатывают хлоридным или серноокислотным способом [2]. На основе процесса и агрегата типа СЭР предлагается более дешевая безотходная технология переработки титаномагнетитового концентрата, которая заключается в практически полном восстановлении железа и переводе оксидов титана в шлак с целью его дальнейшего использования [3].

Особенности и сущность нового непрерывного металлургического процесса СЭР

В основу нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа СЭР положена идея реализации принципов синерге-

тики и неравновесной термодинамики [4–10], которая позволила создать теоретические основы процесса и универсальную конструкцию агрегата, в котором возможно осуществление различных процессов и технологий [11, 12]. Основопологающие принципы создания процесса и агрегата СЭР можно сформулировать следующим образом: создание большой реакционной поверхности с последующей организацией вынужденного движения образовавшейся газовой взвеси под давлением; реализация принципа газодинамического запирания выходного канала в разработанном на основе этой идеи реакторе-осцилляторе; создание неравновесного стационарного колебательного режима на заданном уровне давления; нижняя подача подготовленной в реакторе-осцилляторе двухфазной рабочей смеси в вертикальный колонный реактор.

На основе этих принципов удалось перейти от системы пространственно разделенных металла, шлака и газа к потоку двухфазной среды, представляющей систему, состоящую из огромного числа микрореакторов, в которых в соизмеримых массовых соотношениях присутствуют металлическая, шлаковая и газовая фазы, что обеспечивает высокие скорости тепломассообменных процессов, окислительно-восстановительных реакций и фазовых превращений [11].

Непрерывный струйно-эмульсионный процесс реализуется в технологическом модуле, схема которого приведена на рис. 1 [11].

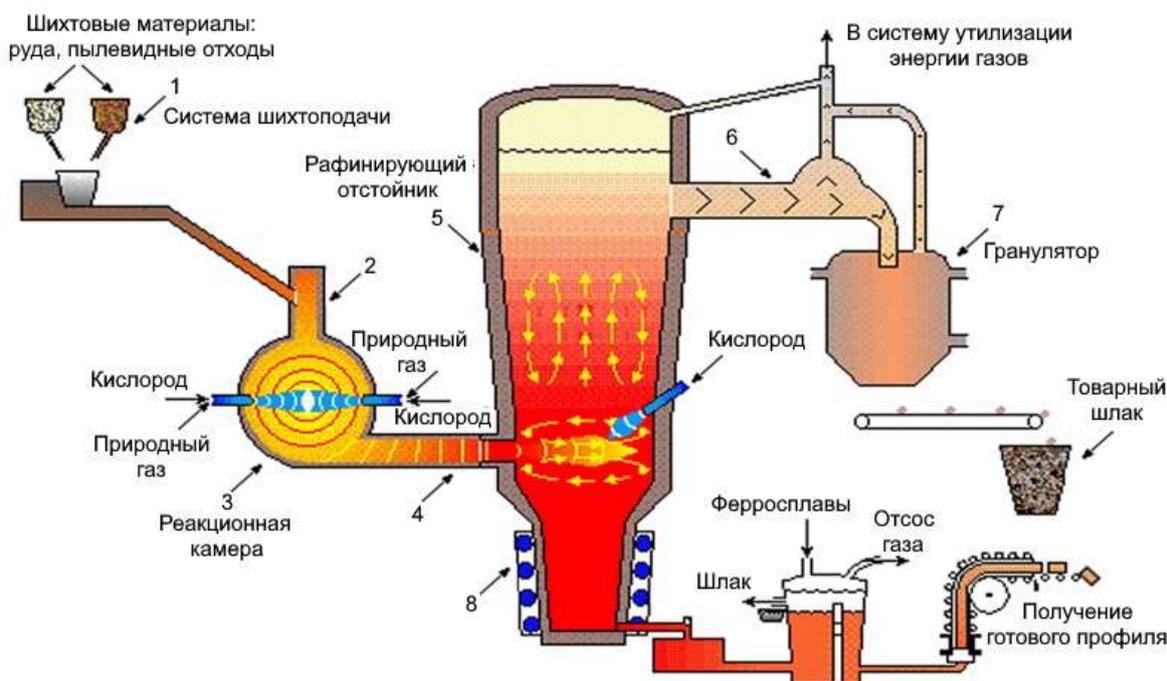


Рис. 1. Схема процесса и агрегата СЭР

Fig. 1. Process and unit diagram JEP

Основными конструктивными элементами агрегата являются система шихтоподачи 1, 2, реакционная камера сферической формы 3, соединенная цилиндрическим каналом 4 с рафинирующим отстойником 5, представляющим агрегат вертикального колонного типа, и шлакоприемник-гранулятор 6, 7. Также имеются гидравлическая система обеспечения гарнисажного охлаждения с полной утилизацией тепла, система утилизации энергии отходящих газов, система контроля и автоматического управления, система доводки металла и система разливки.

Реакционная камера представляет самоорганизующийся реактор струйного типа под давлением, в котором в зависимости от вида технологии происходят следующие процессы: горение топлива, нагрев компонентов шихты, диспергирование потоков металла и шихтовых материалов, окислительные реакции и твердофазное восстановление [11]. Кислород подается в реакционную камеру посредством установленных в диаметральном направлении фурм. Для создания высоких удельных поверхностей контакта фаз металл-газ и наилучших условий взаимодействия сыпучих материалов с кислородом, а также снижения температуры в пределах первичной зоны взаимодействия каналы подачи сыпучих материалов и жидкого металла установлены в одной плоскости с устройством для подачи газообразного кислорода [11]. Из реакционной камеры по соединительному каналу двухфазный поток продуктов реакций поступает в нижнюю часть рафинирующего отстойника выше границы раздела фаз металл-шлак [11].

Рафинирующий отстойник представляет эмульсионный реактор в виде высокой вертикальной колонны, заполненной газошлакометаллической эмульсией и шлаковой пеной, в котором протекают окислительно-восстановительные реакции, реакции жидкофазного восстановления, дожигания оксида углерода в объеме шлаковой пены, происходит технологическая очистка отходящих газов и разделение металла, шлака и газа [11]. Шлак и газ отводятся из рафинирующего отстойника через горизонтальный канал и два вертикальных канала, при этом происходит частичная очистка отходящих газов. Выпуск металла и шлака осуществляется через летку.

Технология переработки титаномагнетитовых концентратов в агрегате СЭР

В варианте технологии переработки титанового концентрата шихта с добавлением мелкого коксика в качестве восстановителя пластифицируется в смесителе путем добавления отработанного масла и с помощью бетононасоса подается под давлением в реакционную камеру на встречные струи кислорода, в результате чего происхо-

дит образование больших поверхностей взаимодействия. При этом за счет неполного сжигания в реакционной камере углерода топлива в соответствии с долей поданного кислорода происходит нагрев и частичное восстановление оксидов с образованием газовзвеси, которая затем поступает в нижнюю часть рафинирующего отстойника по соединительному каналу. В рафинирующем отстойнике происходят процессы жидкофазного восстановления, разделение фаз, дожигание отходящих газов, выпуск металла, шлака и отвод газов.

Соотношение восстановителей и кислорода, подаваемых в реакционную камеру и рафинирующий отстойник, рассчитывается из условий получения в газошлаковой эмульсии, находящейся в рафинирующем отстойнике, содержания оксидов железа в пределах 5–8 % от массы шлака и корректируется путем дополнительной подачи коксика или угля на верхний слой эмульсии. Такое содержание оксидов железа обусловлено необходимостью устранения сворачивания шлака. Кроме реакций горения топлива и восстановления железа, в различных зонах агрегата протекают реакции восстановления высших оксидов титана углеродом, кремнием и алюминием.

Большая часть восстановительных процессов завершается в рафинирующем отстойнике. Здесь же осуществляется частичное дожигание СО до СО₂, которое происходит внутри газошлаковой эмульсии путем подачи кислорода. Расход кислорода выбирается в соответствии с тепловым балансом и составляет 0,2–0,3 м³/с. Первая основная задача — разделение железо- и титаносодержащей (вместе со всеми остальными оксидами) составляющих — решается в рафинирующем отстойнике следующим образом. Поднимающийся сквозь высокий (порядка 4–5 м) слой газошлаковой эмульсии газ по высоте теряет вертикальную составляющую скорости. При этом возрастает гравитационная составляющая, действующая на частицы конденсированной фазы. Вследствие этого содержание более тяжелых оксидов, в первую очередь оксидов железа, уменьшается по высоте снизу вверх, что позволяет выдавать обедненные оксидами железа верхние слои газошлаковой эмульсии в шлакоприемник через наклонный канал.

Для обеспечения удовлетворительной текучести титанистого шлака содержание оксидов железа поддерживается в пределах 5–8 %, что достигается путем выбора углеродсодержащих восстановителей в соотношении 0,95 от стехиометрически необходимого для реакций восстановления оксидов железа, корректировка степени восстановления которых в верхних слоях шлака при необходимости осуществляется подачей мелкого коксика. Восстановленное железо, имеющее плотность большую, чем оксиды, опускается в первый копильник через периферию рафинирующего отстойника.

Исследование и определение оптимальных условий реализации технологии

С целью выяснения принципиальной возможности реализации процесса проведены расчеты для аналога медведевского титаномагнетитового аглоконцентрата. Расчеты проводили с использованием разработанной инструментальной системы «Инжиниринг-металлургия», предназначенной для исследования и оптимизации технологических режимов при совершенствовании существующих и разработке новых металлургических технологий [13–15]. Рассчитаны показатели процесса для секундного расхода шихты, кислорода и углеродсодержащих материалов, представляющих газозвесь с объемным газосодержанием порядка 99 % и секундным расходом металлической части шихты 4 кг. В металлошихту входят титаномагнетитовый концентрат, окалина и шлак конвертерного производства. В разбавленном таким образом концентрате содержится 26,8 % FeO, 46,1 % Fe₂O₃ и 17,5 % TiO₂. Характер изменения состава металла и шлака в зависимости от расхода углеродсодержащего материала показан на рис. 2, из которого следует, что оптимальным является секундный расход кокса порядка 1,4–1,5 кг. Содержание оксида титана в шлаке при этом расходе составляет 43 % (при 30 % CaO и 15 % Al₂O₃). Дальнейшее повышение расхода кокса приводит к появлению карбидов железа и титана. Подобные расчеты также проведены для неразбавленного ильменитового концентрата с содержанием 44,9 % TiO₂ и 36,4 % Fe. Предельно возможное содержание оксида титана в шлаке для этого концентрата составило 78–79 %.

Далее проведены расчеты для медведевского аглоконцентрата с содержанием TiO₂ порядка 18–20 %, который был получен разбавлением некондиционного ильменитового концентрата с содержанием 38 % TiO₂ смесью прокатной окалины и шлама конвертерной газоочистки. Состав и расходы железорудной части шихты приведены в табл. 1. Для заданной производительности (0,75 кг/с окалины, 0,75 кг/с шлама, 2,5 кг/с некондиционного титаномагнетитового концентрата) определены следующие расходы шихтовых

материалов: 0,27 кг/с извести, 1,96 кг/с кислорода, 0,10 кг/с алюминия, 0,10 кг/с ферросилиция.

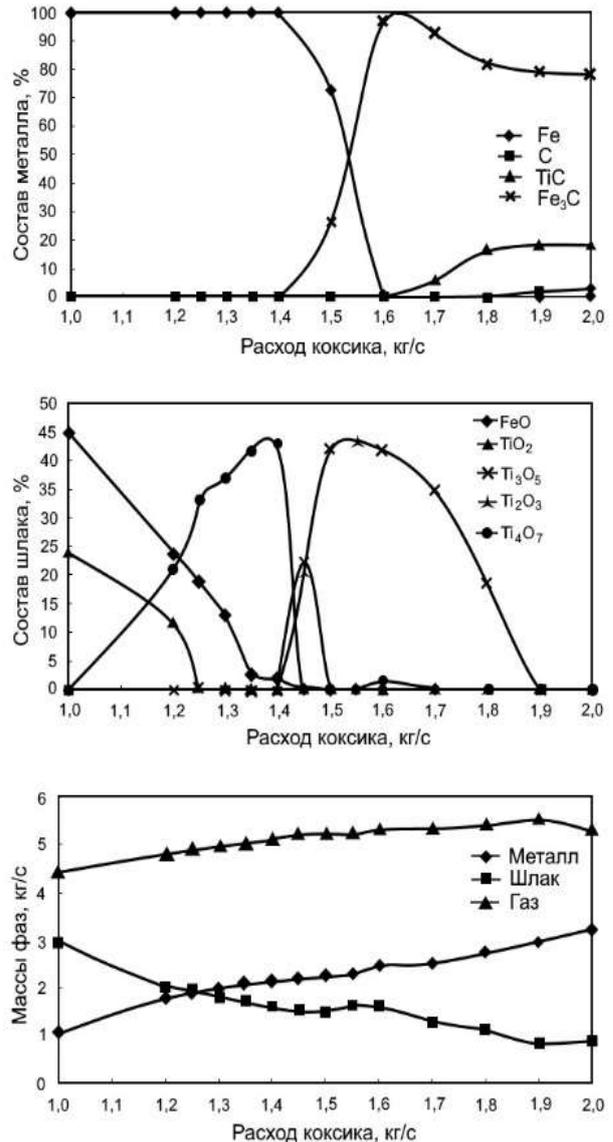


Рис. 2. Результаты исследования процесса переработки разбавленного титаномагнетитового концентрата

Fig. 2. Results of study of the diluted titanium magnetite concentrate processing

ТАБЛИЦА 1. СОСТАВ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, %

TABLE 1. COMPOSITION OF IRON ORE MATERIALS, %

Материал	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe _{общ}	MnO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe _{мет}	C	S	P	Расход, кг/с
Окалина	30,40	67,55	70,94	1,00	1,00	—	—	—	—	0,05	—	—	—	—	0,75
Шлам	24,00	50,00	56,17	0,60	2,20	14,00	0,90	0,70	—	0,50	2,50	4,50	0,10	—	0,75
Концентрат	24,30	17,42	31,10	0,60	8,40	2,46	3,60	—	38,00	—	—	0,08	0,17	0,02	2,50

Провели исследования влияния расхода кокса, который варьировали в пределах от 0 до 2,4 кг/с, на параметры процесса при температуре 1873 К.

На рис. 3 приведены основные результаты, анализ которых показал наличие трех областей в диапазоне изменения расхода восстановителя.

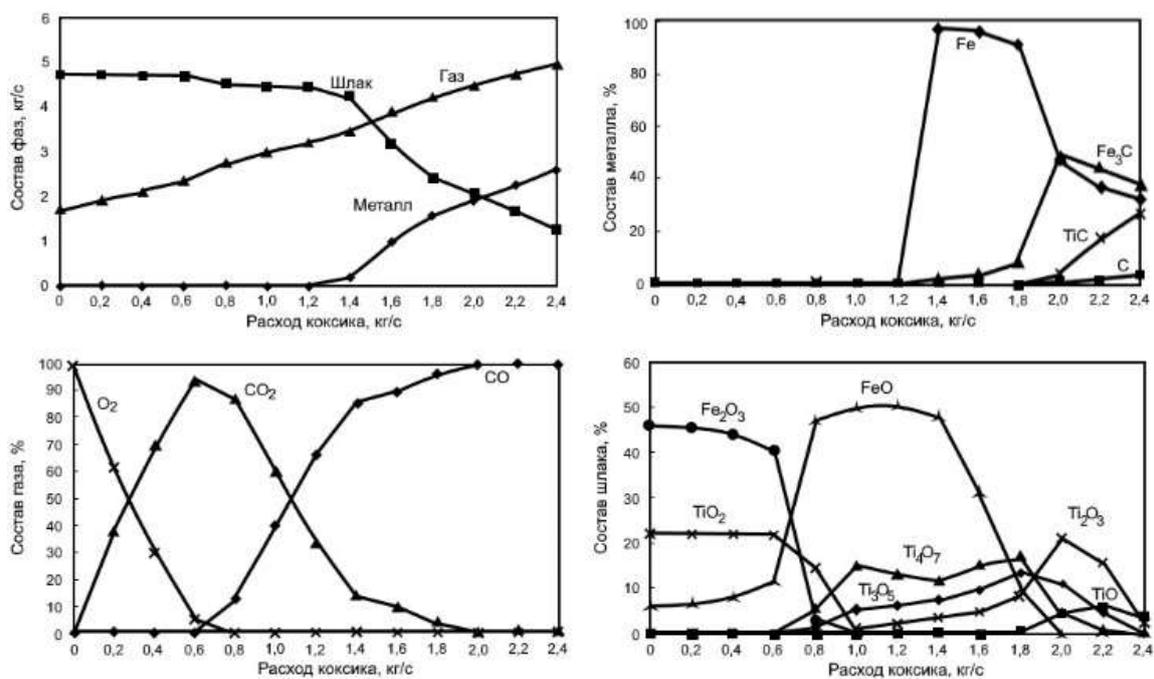


Рис. 3. Результаты исследования процесса переработки некондиционного ильменитового концентрата

Fig. 3. The results of study of the substandard ilmenite concentrate processing

Первая область — окислительная, существует при значениях расхода кокса до 0,8 кг/с. Для нее характерно отсутствие восстановленной фазы и наличие кислорода в газе. Оксидная фаза представлена высшими оксидами железа и титана. При дальнейшем увеличении количества кокса до 1,2 кг/с в шлаке исчезают оксиды Fe₂O₃ и TiO₂ и появляются оксид FeO и низшие оксиды титана, а также металлическая фаза, состоящая из железа и его карбида. В газе исчезает кислород, растет содержание CO и уменьшается CO₂. Дальнейшее увеличение расхода кокса до 2,0 кг/с приводит к исчезновению FeO в шлаке и появлению TiO. В металле появляются свободный углерод и карбид титана. Система переходит в восстановительную область. Газовая фаза в этой области полностью

состоит из CO. Таким образом, в результате термодинамических исследований определены границы окислительной, переходной и восстановительной областей и диапазоны изменения состава фаз для данного варианта технологии.

На следующем этапе решалась задача расчета определения оптимальных расходов шихтовых материалов, восстановителей и топлива с учетом заданного температурного состояния процесса при различной степени фиксации CO в газовой фазе. Определение расходов кокса, извести и кислорода осуществляли для содержания FeO в шлаке от 5 до 30 % при следующих параметрах: температура металла — 1873 К, основность шлага — 1. Основные результаты расчетов приведены в табл. 2–4.

ТАБЛИЦА 2. РАСХОДЫ МАТЕРИАЛОВ, кг/с

TABLE 2. MATERIAL COSTS, kg/s

FeO, %	Расход кокса при различном содержании CO в газе			Расход кислорода при различном содержании CO в газе		
	30 %	50 %	70 %	30 %	50 %	70 %
5	0,3392	0,8729	1,6623	1,867	2,335	3,027
10	0,3166	0,8397	1,6115	1,845	2,305	2,981
15	0,2906	0,8037	1,5543	1,821	2,271	2,929
20	0,2615	0,7633	1,4971	1,793	2,234	2,876
25	0,2323	0,7183	1,4273	1,766	2,192	2,813
30	0,1967	0,6645	1,3511	1,732	2,142	2,743

ТАБЛИЦА 3. МАССЫ ФАЗ

TABLE 3. PHASE MASSES

FeO, %	Выход металла, кг/с			Выход шлака, кг/с			Выход газа, кг/с		
	содержание CO в газовой фазе								
	30 %	50 %	70 %	30 %	50 %	70 %	30 %	50 %	70 %
5	1,86	1,86	1,86	1,52	1,61	1,74	3,82	4,77	6,16
10	1,79	1,79	1,78	1,60	1,70	1,83	3,76	4,68	6,05
15	1,72	1,71	1,70	1,69	1,79	1,93	3,69	4,60	5,92
20	1,63	1,62	1,61	1,80	1,89	2,03	3,61	4,50	5,79
25	1,54	1,53	1,50	1,91	2,01	2,15	3,54	4,39	5,64
30	1,44	1,41	1,39	2,03	2,14	2,29	3,44	4,26	5,47

ТАБЛИЦА 4. СОСТАВ ШЛАКА

TABLE 4. SLAG COMPOSITION

FeO, %	TiO ₂ , %			SiO ₂ , %			FeO, %		
	содержание CO в газовой фазе								
	30 %	50 %	70 %	30 %	50 %	70 %	30 %	50 %	70 %
5	50,00	47,48	43,85	14,51	15,64	17,16	4,82	5,01	4,94
10	47,58	44,90	41,94	13,69	14,74	16,15	9,90	10,09	10,06
15	44,64	42,59	39,50	12,85	13,86	15,12	15,11	15,04	15,25
20	42,33	40,02	37,31	12,00	12,98	14,20	20,32	20,03	19,92
25	39,75	37,74	35,36	11,25	12,10	13,20	24,95	24,97	25,03
30	37,46	35,70	33,30	10,43	11,18	12,22	29,97	30,19	29,96

Графические зависимости представлены на рис. 4 и 5. На основании полученных результатов были оценены технологически допустимые расходы углеродсодержащих материалов, зависимости масс металла и шлака от возможного содер-

жания оксидов железа в шлаке при различном содержании CO в газовой фазе (см. рис. 4), а также предельно возможное содержание оксидов титана в шлаке в зависимости от доли титанового концентрата в шихте (см. рис. 5).

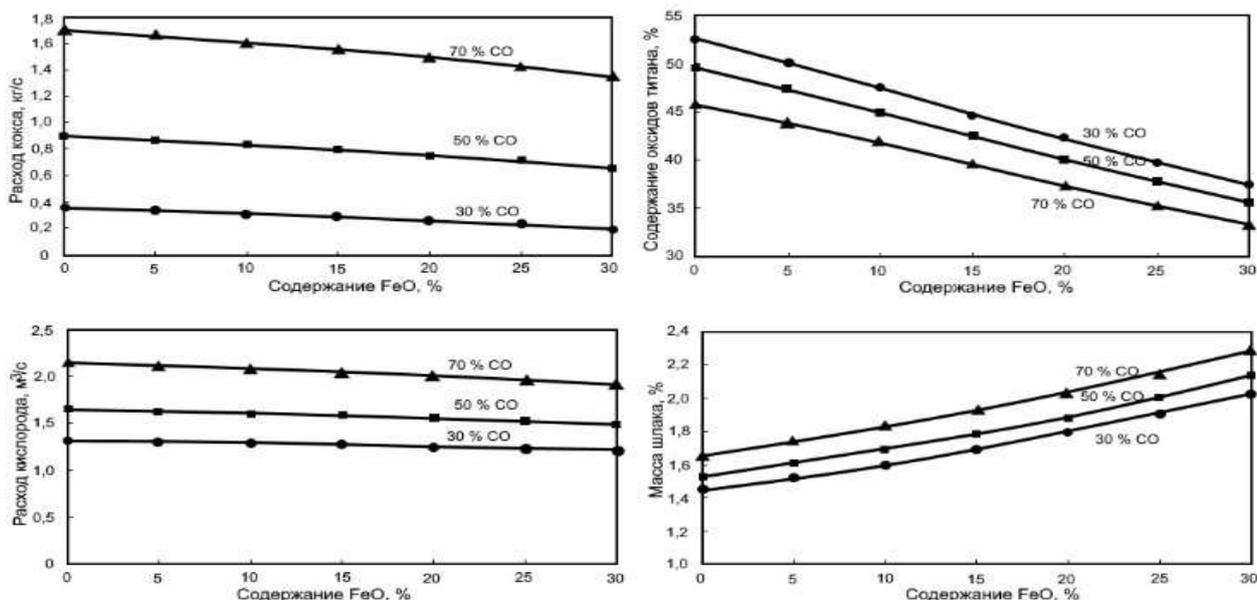


Рис. 4. Зависимости параметров процесса переработки титаномагнетитового концентрата от содержания FeO в шлаке при различном составе газовой фазы

Fig. 4. Effects of the titanomagnetite concentrate processing parameters on the content of FeO in the slag with different composition of the gas phase

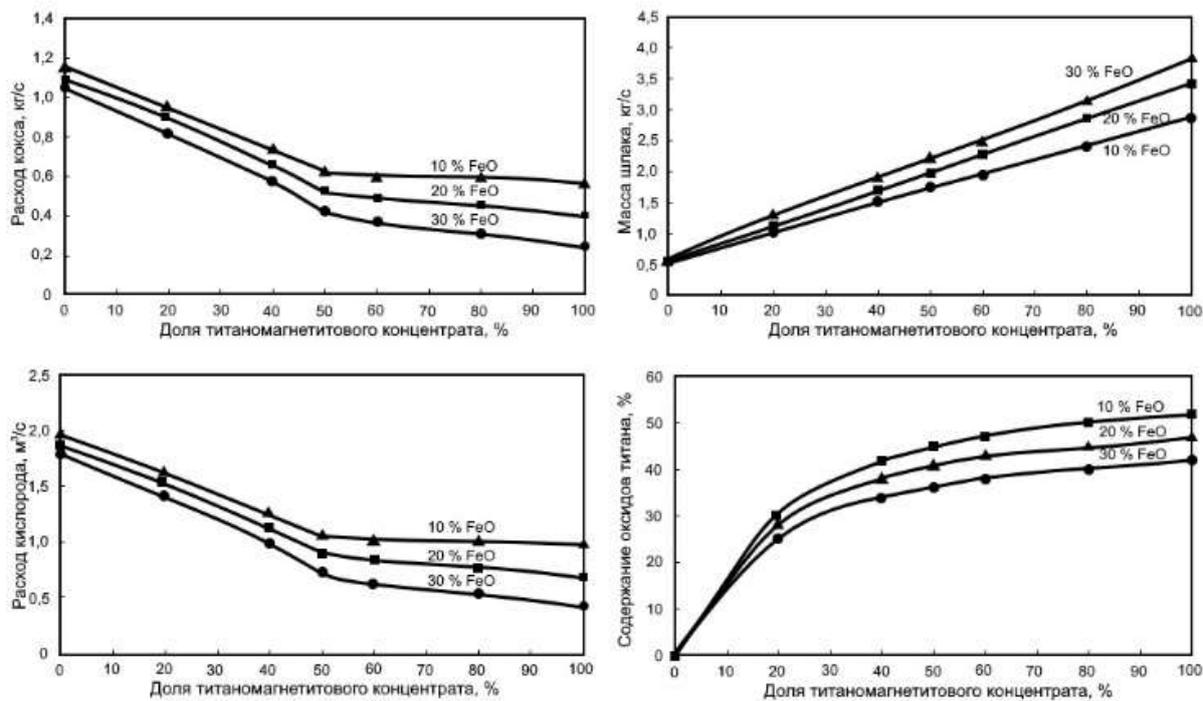


Рис. 5. Зависимости параметров процесса переработки титаномагнетитового концентрата от доли титаномагнетитового концентрата в шихте

Fig. 5. Effects of the titanomagnetite concentrate processing parameters on the proportion of titanomagnetite concentrate in the charge

Как видно из рис. 5, оптимальная доля титаномагнетитового концентрата в металлшихте составляет 50 %. При большем расходе концентрата не происходит существенного снижения расходов кокса и кислорода.

Заключение

Таким образом, на основе агрегата струйно-эмульсионного типа СЭР разработана комплекс-

ная технология переработки титаномагнетитового концентрата, в которой осуществляется сначала практически полное разделение железо- и титансодержащей составляющих, а затем производится углеродо-, силико- или алюмотермическое восстановление расплавленного горячего шлака. Подобная технология может быть использована для извлечения марганца, ванадия и других элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дуррер Р., Фолькерт Г. Металлургия ферросплавов; пер. с нем. — М.: Металлургия, 1976. — 480 с.
2. Химическая энциклопедия. Т. 4 / Под ред. И.Л. Кнунянц и др. — М.: Советская энциклопедия, 1995. — 639 с.
3. Цымбал В.П., Павлов В.В., Рыбенко И.А. Нетрадиционный подход к переработке титаномагнетитовых и железомарганцевых руд // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 10. С. 90–94.
4. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. — New York: Wiley, 1977. — 504 p.
5. Haken H. Synergetics. — Berlin: Springer-Verlag, 1978. — 355 p.
6. Prigogine I., Stengers I. Order Out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature. — London: Heinemann, 1984.
7. Kondepudi D., Prigogine I. Modern Thermodynamics. — New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2015. — 523 p.
8. Gladyshev G.P. Hierarchical Thermodynamics Rules the World to the Extent of Its Applicability // Norwegian Journal of development of the International Science. 2019. V. 1. № 27. P. 60–65.
9. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. — М.: Мир, 1979. — 512 с.
10. Хакен Г. Синергетика. — М.: Мир, 1980. — 406 с.
11. Процесс СЭР — металлургический струйно-эмульсионный реактор: монография / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. — М.: Металлургиздат, 2014. — 488 с.
12. Цымбал В.П., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А. и др. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 8. С. 572–577.
13. Рыбенко И.А. Оптимизация технологий в струйно-эмульсионном металлургическом агрегате с использованием методики и инструментальной системы моделирования // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 3. С. 60–65.

14. Рыбенко И.А. Разработка оптимальных технологических режимов получения металлов с использованием методов математического моделирования и инструментальных систем // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 2. С. 57–61.
15. Рыбенко И.А. Решение задач оптимизации металлургических процессов с использованием инструментальной системы «Инжиниринг-Металлургия» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 3. С. 42–47.

Поступила 8 декабря 2021 г.

REFERENCES

1. Durrer R., Fol'kert G. *Metallurgiya ferrosplavov* [Ferroalloy Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 480 p. (In Russ.).
2. *Khimicheskaya entsiklopediya. T. 4* [Chemical Encyclopaedia. Vol. 4]. I.L. Knunyants ed. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1995, 639 p. (In Russ.).
3. Tsymbal V.P., Pavlov V.V., Rybenko I.A. The Non-Traditional Approach to Processing the Titanomagnetite and Iron–Manganese Ores. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2015, no. 10, pp. 90–94. (In Russ.).
4. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. New York: Wiley, 1977, 504 p.
5. Haken H. *Synergetics*. Berlin: Springer-Verlag, 1978, 355 p.
6. Prigogine I., Stengers I. *Order Out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature*. London: Heinemann, 1984.
7. Kondepudi D., Prigogine I. *Modern Thermodynamics*. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2015, 523 p.
8. Gladyshev G.P. Hierarchical Thermodynamics Rules the World to the Extent of Its Applicability. *Norwegian Journal of development of the International Science*, 2019, vol. 1, no. 27, pp. 60–65.
9. Nikolis G., Prigozhin I. *Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemakh* [Self-Organisation in Non-Equilibrium Systems]. Moscow: Mir, 1979, 512 p. (In Russ.).
10. Khaken G. *Sinergetika* [Synergetics]. Moscow: Mir, 1980, 406 p. (In Russ.).
11. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Rybenko I.A. etc. *Protsess SER — metallurgicheskii struino-emul'sionnyi reaktor: monografiya* [JEP Process – Metallurgical Jet-Emulsion Reactor]. Moscow: Metallurgizdat, 2014, 488 p. (In Russ.).
12. Tsymbal V.P., Kozhemyachenko V.I., Rybenko I.A., Padalko A.G., Olennikov A.A. Usage of the Principles of Self-Organization and Dissipative Structures in a New Jet-Emulsion Metallurgical Process. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2015, vol. 58, no. 8, pp. 572–577. (In Russ.). Doi: 10.17073/0368-0797-2015-8-572-577.
13. Rybenko I.A. The Optimization of the Technologies in the Jet-Emulsive Metallurgical Plant with the Use of the Methodology and Instrumented System of the Simulation. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2017, no. 3, pp. 60–65. (In Russ.).
14. Rybenko I.A. Development of Optimal Technological Modes of Metal Production Processes Using Mathematic Modelling Methods and Instrumental Systems. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 2, pp. 57–61. (In Russ.).
15. Rybenko I.A. Solving a Task of Metallurgical Processes Optimization by Using Instrumental System “Engineering-Metallurgy”. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 3, pp. 42–47. (In Russ.).

Received December 8, 2021