

СРАВНЕНИЕ ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА ИЗ ИЛЬМЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА УГЛЕРОДОМ ИЛИ ВОДОРОДОМ

СМИРНОВ К.И. 

Смирнов Константин Игоревич – Кандидат технических наук, научный сотрудник НИЛ «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Российская Федерация
E-mail: smirnovk@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3678-2636>

Аннотация. Основными пирометаллургическими методами являются одностадийная электроплавка и двухстадийный способ по схеме «трубчатая печь – плавильный агрегат». Обе схемы переработки предполагают использование углерода в качестве восстановителя, что приводит в свою очередь к образованию продуктов металлического железа и концентрата оксидов титана на основе аносовита – Ti_3O_5 . Восстановительный обжиг ильменитового концентрата позволяет селективно восстанавливать железо из ильменитового концентрата и углеродом и водородом с получением мягкого железа и концентрата оксидов титана с структурой рутила – TiO_2 . Показано, что процесс карботермического восстановления железа из ильменита при температуре 1300 °С протекает по реакции: $3FeTiO_3 + 4C = 3Fe + Ti_3O_5 + 4CO$. При температуре 900 °С восстановление железа из ильменита углеродом и водородом протекают по реакциям: $FeTiO_3 + C = Fe + TiO_2 + CO$, $FeTiO_3 + H_2 = Fe + TiO_2 + H_2O$. Представлены результаты расчета затрат энергии для реакций карботермического восстановления при температуре 1300 °С и 900 °С и водородного при температуре 900 °С. По результатам расчета наименьшее количество затрат фиксируется при восстановлении железа водородом при температуре 900 °С и составляет 215,81 кДж. При такой же температуре и восстановлении углеродом суммарные затраты энергии составляют 341,29 кДж. Суммарные затраты энергии на реакцию взаимодействия ильменита с углеродом при температуре 1300 °С составляют 484,51 кДж. При сравнении результатов расчета установлено, что восстановление железа водородом при температуре 900 °С в 1,58 раз менее затратное карботермического восстановления при той же температуре, и в 2,25 раза чем карботермическое восстановление при температуре 1300 °С. Карботермическое восстановление железа при температуре 1300 °С требует еще больших затрат энергии за счет нагрева шихты до более высокой температуры и частичного восстановления титана до низшего оксида – аносовита Ti_3O_5 .

Ключевые слова: ильменит, карботермическое восстановление, восстановление водородом, твердофазное восстановление, железо, диоксид титана, рутил, аносовит.

Введение

В последнее время в металлургическом сообществе поднимается вопрос о возможной структурной перестройки металлургической промышленности с целью ее декарбонизации [1,2]. Альтернативой использования углерода в качестве восстановителя может стать водород особенностями физико-химических свойств которого является газообразное агрегатное состояние самого водорода и продукта реакции восстановления, относительно высокое при низкой температуре и уменьшающееся с повышением температуры сродство к кислороду, ничтожно малая растворимость в твёрдом железе. Процесс восстановления металлов водородсодержащими газами из богатых руд, как перспектива замены углерода изучался в работах [3-9]. Структурная перестройка металлургии достаточно сложный и капиталоемкий процесс, требующий разработки новых технологий, агрегатов и подготовки квалифицированных кадров, однако уже в ближайшей перспективе целесообразно использовать водород в существующих агрегатах с целью селективного извлечения железа из комплексных титаномагнетитовых, ильменитовых, сидеритовых руд и получения из них не только мягкое железо, но одновременно ещё и востребованные концентраты оксидов титана, магния и других металлов [10,11]. Например, производство пигментного диоксида титана по данным за 2019 год импорт которого составил 53.6 тыс. т., что составляет 67.5 % импорта в потреблении [12].

Учитывая высокую потребность в пигментном диоксиде титана Россия, занимая одну из ведущих позиций в мире по запасам титаносодержащего железорудного сырья, при организации их переработки смогла бы организовать надежную на длительную перспективу сырьевую базу. Основными минералами титаносодержащего железорудного сырья являются ильменит $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ и титаномagnetит $[\text{Fe}, \text{Ti}]_3\text{O}_4$. Переработка ильменита на пигментный диоксид титана является более предпочтительной ввиду большего содержания диоксида титана.

Использование водорода в качестве восстановителя для переработки ильменитов является перспективным направлением развития технологии, ввиду возможности проведения технологического процесса восстановления при более низкой температуре по сравнению с углеродом, а также отсутствием углерода в технологическом цикле, так как основной технологической трудностью переработки титаносодержащих железорудных материалов карботермическим методом является образование тугоплавких карбидов титана. Однако процессы селективного восстановления железа водородом из ильменитовых концентратов мало изучены и для внедрения новых технологий их переработки необходимо проведение серьезных научных исследований.

Существующие способы переработки ильменитовых концентратов ведут гидрометаллургическими и пирометаллургическими методами. Основным гидрометаллургическим способом выделения диоксида титана является серноокислотный, в результате которого образуются продукты пигментный диоксид титана и мало востребованные техногенные образования – соли железа [13, 14]. Основными пирометаллургическими способами переработки ильменитовых концентратов, реализованными на практике, является одностадийная электроплавка в рудовосстановительной печи, компания «ВСМПО-АВИСМА», г. Березняки, Россия и двухстадийный «трубчатая печь – плавильный агрегат», компания «RTFT» г. Сорель-Трейси, Канада. Электроплавка в рудовосстановительных печах при температурах близких к температурам плавления титанатных шлаков $1600 \dots 1700^\circ\text{C}$ позволяет получать металлическое железо в виде чугуна и шлак на основе аносовита – Ti_3O_5 [15]. Ввиду того, что при осуществлении процесса плавки используется кокс в качестве восстановителя железа, недостатком такой переработки является необходимость наличия небольшого количества оксидов железа в шлаке около 10 масс. % для предотвращения образования карбидов титана. Двухстадийная схема также предполагает использование углерода в качестве восстановителя железа. Однако, протекание процесса в твердой фазе, позволяет достигать более высокой степени металлизации по железу, что позволяет получать металлическое железо и концентрат оксидов титана с содержанием около 75 масс. % [16]. Процесс восстановления ведут в интервале температур $1200 \dots 1300^\circ\text{C}$ в результате чего совместно с железом частично восстанавливается титан с образованием оксидной фазы на основе аносовита. После восстановительного обжига металлизированный концентрат нагревают и разделяют плавлением.

В работе [17] экспериментально показана последовательность преобразования фаз при карботермическом и водородном восстановлении, и обоснована целесообразность переработки ильменитового концентрата с использованием водорода. Восстановление железа из ильменита углеродом в твердой фазе при температуре 1300°C протекает с образованием металлического железа и частичным восстановлением титана с Ti^{4+} до Ti^{2+} , что приводит к преобразованию структуры оксидной оксида – образованию аносовита Ti_3O_5 , рисунок 1б. При температуре 900°C возможно протекание процесса с образованием железа и TiO_2 , т.е. организация процесса без восстановления титана, однако скорость процесса при данных условиях низкая и не позволяет достичь полного восстановления железа – рисунок 1а. Восстановление железа из ильменита водородом при температуре 900°C позволяет достигать высокой степени металлизации с высокой скоростью реакции, при этом получая востребованные продукты железо и TiO_2 – рисунок 1с.

Таким образом, при температуре 900 °С и использовании в качестве восстановителя углерод или водород получают более ценные продукты железа и рутил TiO₂.

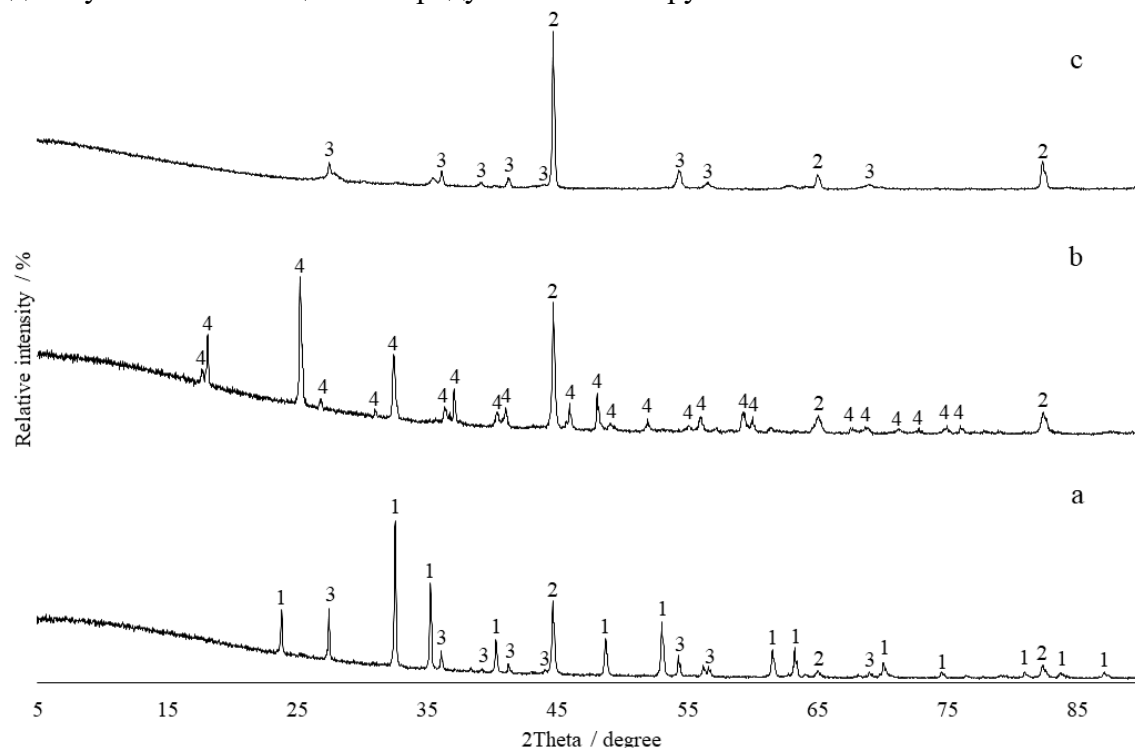


Рис.1. Дифрактограммы продуктов металлизации: а – при температуре 900 °С и выдержке 60 минут, восстановитель графит; б – при температуре 1300 °С и выдержке 1 минут, восстановитель графит; с – при температуре 900 °С и выдержке 30 минут, восстановитель водород. (1 – FeTiO₃; 2 – Fe; 3 – TiO₂; 4 – Ti₃O₅)

Целью данной работы является сравнительное исследование затрат энергии на селективное твердофазное восстановление железа из ильменитового концентрата при использовании в качестве восстановителя углерод или водород.

Материалы и методы исследования

В результате восстановительного обжига с использованием углерода в качестве восстановителя при температуре 1300 °С и выдержке 60 минут образуются продукты металлическое железо и аносовит (Ti₃O₅). Данные продукты образуются в результате восстановления железа и частичного восстановления титана до низших оксидов по суммарной реакции 1. Восстановительный обжиг при использовании углерода и водорода в качестве восстановителя в условиях температуры 900 °С и выдержке 60 и 30 минут соответственно протекает с образованием железа и рутила (TiO₂) по реакциям 2 и 3.



Сравним по затратам энергии при протекании этих трех реакций получения железа и концентрата оксидов титана. Примем, что реакции 1, 2 и 3 протекают полностью, т.е. остаются только продукты реакции. Тепловой эффект для реакций 1, 2 и 3 при температурах 1300 °С (1573 К), 900 °С (1173 К) и 900 °С (1173 К) соответственно рассчитывался по формулам:

$$\Delta_r H_T^0(1) = 3\Delta H_{Fe}(T) + \Delta H_{Ti_3O_5}(T) + 4\Delta H_{CO}(T) - 3\Delta H_{FeTiO_3}(T) - 4\Delta H_C(T) \quad (4)$$

$$\Delta_r H_T^0(2) = \Delta H_{Fe}(T) + \Delta H_{TiO_2}(T) + \Delta H_{CO}(T) - \Delta H_{FeTiO_3}(T) - \Delta H_C(T) \quad (5)$$

$$\Delta_r H_T^0(3) = \Delta H_{Fe}(T) + \Delta H_{TiO_2}(T) + \Delta H_{H_2O}(T) - \Delta H_{FeTiO_3}(T) - \Delta H_{H_2}(T) \quad (6)$$

Энтальпия для каждого компонента этих реакций при заданной температуре рассчитывалась по формуле:

$$\Delta H_i(T) = \Delta H_i(T^0) + \int_{T^0}^T C p_i(T) dT \quad (7)$$

Затраты энергии на нагрев реагентов реакций 1, 2 и 3 от температуры 25 °С (298 К) до температуры протекания реакций рассчитывали по формулам:

$$\Delta Q_H(1) = [3\Delta H_{FeTiO_3}(T) - 4\Delta H_C(T)] - [3\Delta H_{FeTiO_3}(T^0) - 4\Delta H_C(T^0)] \quad (8)$$

$$\Delta Q_H(2) = [\Delta H_{FeTiO_3}(T) - \Delta H_C(T)] - [\Delta H_{FeTiO_3}(T^0) - \Delta H_C(T^0)] \quad (9)$$

$$\Delta Q_H(2) = [\Delta H_{FeTiO_3}(T) - \Delta H_{H_2}(T)] - [\Delta H_{FeTiO_3}(T^0) - \Delta H_{H_2}(T^0)] \quad (10)$$

Для проведения расчета использовали термодинамические характеристики компонентов реакции из источника [18]. Для сравнения результатов расчет проводили на 1 моль ильменита – FeTiO₃.

Результаты и их обсуждения

Результаты расчета затрат энергии на процесс восстановления по реакциям 1, 2 и 3 представлены в таблице 1. По результатам расчета наименьшее количество затрат фиксируется при восстановлении железа водородом при температуре 900 °С и составляет 215,81 кДж из них 80,96 кДж тепловой эффект реакции и 134,85 кДж нагрев шихтовых материалов ильменита и водорода. При такой же температуре восстановление углеродом будет более затратное. Суммарные затраты энергии для восстановления углеродом при температуре 900 °С составляют 341,29 кДж из них 217,23 кДж тепловой эффект реакции и 124,06 кДж нагрев шихтовых материалов ильменита и углерода. Суммарные затраты энергии на реакцию взаимодействия ильменита с углеродом при температуре 1300 °С составляют 484,51 кДж из них 287,32 кДж тепловой эффект реакции и 197,19 кДж нагрев шихтовых материалов ильменита и углерода.

Таблица 1. Затраты энергии реакции восстановления на 1 моль FeTiO₃

№	Реакция	T, К	$\Delta_r H_T^0$, кДж	Q_H , кДж	$\Delta_r H_T^0 + Q_H$, кДж
1	$3FeTiO_3 + 4C = 3Fe + Ti_3O_5 + 4CO$	1573	287,32	197,19	484,51
2	$FeTiO_3 + C = Fe + TiO_2 + CO$	1173	217,23	124,06	341,29
3	$FeTiO_3 + H_2 = Fe + TiO_2 + H_2O$	1173	80,96	134,85	215,81

Таким образом, восстановление железа водородом на 1 моль FeTiO₃ при температуре 900 °С в 1,58 раз менее затратное карботермического восстановления при той же температуре, и в 2.25 раза чем карботермическое восстановление при температуре 1300°С.

Согласно законам термодинамики, переход системы из состояния 1 (Ильменит) в состояние 2 (железо, TiO₂ и кислород) требует одинаковых затрат энергии независимо от пути перехода, поэтому на восстановление железа, разрыв связи железа с ильменитом, должно быть израсходовано такое же количество энергии при использовании углерода или водорода. Разница в затратах энергии при температуре 900 °С и использовании различных восстановителей заключается в разнице теплового эффекта экзотермических реакций окисления углерода и

водорода. Большее количество тепла, выделяемое при сжигании водорода, уменьшает суммарные затраты на процесс по сравнению с карботермическим. Карботермическое восстановление железа при температуре 1300 °С требует еще больших затрат энергии за счет нагрева шихты до более высокой температуры и частичного восстановления титана до низшего оксида – аносовита Ti_3O_5 . Частичное восстановление титана до Ti_3O_5 при температуре 1300 °С способствует увеличению затрат протекания реакции на 70.09 кДж по сравнению с карботермическим процессом при температуре 900 °С, а также на подогрев шихты от 900 до 1300 °С - 73,13 кДж.

В реальном процессе ввиду низкой скорости протекания реакции карботермического восстановления при температуре 900 °С, затраты энергии будут увеличиваться за счет внесения дополнительного тепла компенсирующего потери тепловой энергии в окружающую среду.

Заключение

1. Восстановление железа водородом при температуре 900 °С в 1,58 раз менее затратное карботермического восстановления при той же температуре и в 2.25 раза чем при температуре 1300°С.
2. Повышение температуры карботермического восстановления железа из ильменита до 1300 °С приводит к увеличению затрат энергии на протекание реакции на 70.09 кДж, по сравнению с карботермическим процессом при температуре 900 °С, а также на подогрев шихты от 900 до 1300°С - 73,13 кДж.

Список литературы

1. Косырев К. Л., Еланский Д. Г., Бараненко М. А. Итоги XVI Международного конгресса сталеплавателей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. №. 8. С. 869-875.
2. Григорович К. В. Металлургия XXI века: вызовы и задачи модернизации отрасли в РФ // Физико-химические основы металлургических процессов (ФХОМП 2022). 2022. С. 37-44.
3. Seftejani N. M., Schenk J. Thermodynamic of liquid iron ore reduction by hydrogen thermal plasma // Metals. 2018. V. 8. № 12. 1051.
4. Spreitzer D., Schenk J. Reduction of iron oxides with hydrogen—a review // Steel Research International. 2019. V. 90. № 10. 1900108.
5. John D. H. S., Hayes P. C. Microstructural features produced by the reduction of wustite in H_2/H_2O gas mixtures // Metallurgical Transactions B. 1982. V. 13. P. 117–124.
6. Matthew S. P., Cho T. R., Hayes P. C. Mechanisms of porous iron growth on wustite and magnetite during gaseous reduction // Metallurgical Transactions B. 1990. V. 21. P. 733–741.
7. Matthew S. P., Hayes P. C. Microstructural changes occurring during the gaseous reduction of magnetite // Metallurgical Transactions B. 1990. V. 21. P. 153–172.
8. Matthew S. P., Hayes P. C. In situ observations of the gaseous reduction of magnetite // Metallurgical Transactions B. 1990. V. 21. P. 141–151.
9. Farren M., Matthew S. P., Hayes P. C. Reduction of solid wustite in $H_2/H_2O/CO/CO_2$ gas mixtures // Metallurgical Transactions B. 1990. V. 21. P. 135–139.
10. Роцин В.Е., Роцин А.В., Кузнецов Ю.С., Гойхенберг Ю.Н. Технологические и материаловедческие аспекты перехода в черной металлургии на безуглеродные процессы // Черные металлы. 2021. №11. С. 10-16.
11. Роцин В.Е., Гамов П. А., А.В. Роцин, С.П. Салихов Перспективы освоения водородных технологий в отечественной металлургии // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т 79. №2, С.144-153.
12. Леонтьев Л. И., Волков А. И. Состояние и развитие минерально-сырьевой базы и продукции металлургии для обеспечения импортонезависимости России // Физико-химические

основы металлургических процессов (ФХОМП 2022). 2022. С. 18-36.

13. Гудима Н. В., Шейн Я. П. Краткий справочник по металлургии цветных металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 536 с.

14. Уткин Н.И. Производство цветных металлов. — М.: Интермет Инжиниринг, 2004. — 442 с.

15. Садыхов Г. Б. Фундаментальные проблемы и перспективы использования титанового сырья в России // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. №. 3-4. С. 178-194.

16. Стариков А.И., Ведешкин М.В., Монетов Г.В. Мировой и отечественный опыт переработки титаносодержащего железорудного сырья // Проблемы комплексной переработки титаномагнетитов Южного Урала. — Магнитогорск: Магнитогорский дом печати. 2001. С. 35-47.

17. Смирнов К. И., Гамов П. А., Самолин В.С., Рощин В. Е. Селективное восстановление железа из ильменитового концентрата // Черные металлы. 2024. № 6. С. 10-16.

18. Кубашевский О., Олкок К. Б. Металлургическая термехимия. — М.: Металлургия, 1982. — 392 с.

References

1. Kosyrev K. L., Elanskij D. G., Baranenko M. A. Itogi XVI Mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov // CHernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoj i ekonomicheskoj informacii. 2021. T. 77. №. 8. S. 869-875.

2. Grigorovich K. V. Metallurgiya XXI veka: vyzovy i zadachi modernizacii otrasli v RF // Fiziko-himicheskie osnovy metallurgicheskikh processov (FHOMP 2022). 2022. S. 37-44.

3. Seftejani N. M., Schenk J. Thermodynamic of liquid iron ore reduction by hydrogen thermal plasma // Metals. 2018. V. 8. № 12. 1051.

4. Spreitzer D., Schenk J. Reduction of iron oxides with hydrogen—a review // Steel Research International. 2019. V. 90. № 10. 1900108.

5. John D. H. S., Hayes P. C. Microstructural features produced by the reduction of wustite in H₂/H₂O gas mixtures // Metallurgical Transactions B. 1982. V. 13. P. 117–124.

6. Matthew S. P., Cho T. R., Hayes P. C. Mechanisms of porous iron growth on wustite and magnetite during gaseous reduction // Metallurgical Transactions B. 1990. V. 21. P. 733–741.

7. Matthew S. P., Hayes P. C. Microstructural changes occurring during the gaseous reduction of magnetite // Metallurgical Transactions B. 1990. V. 21. P. 153–172.

8. Matthew S. P., Hayes P. C. In situ observations of the gaseous reduction of magnetite // Metallurgical Transactions B. 1990. V. 21. P. 141–151.

9. Farren M., Matthew S. P., Hayes P. C. Reduction of solid wustite in H₂/H₂O/CO/CO₂ gas mixtures // Metallurgical Transactions B. 1990. V. 21. P. 135–139.

10. Roshchin V.E., Roshchin A.V., Kuznecov YU.S., Gojhenberg YU.N. Tekhnologicheskie i materialovedcheskie aspekty perekhoda v chernoј metallurgii na bezuglerodnye processy // CHernye metally. 2021. №11. S. 10-16.

11. Roshchin V.E., Gamov P. A., A.V. Roshchin, S.P. Salihov Perspektivy osvoeniya vodorodnyh tekhnologij v otechestvennoј metallurgii // CHyornaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoj i ekonomicheskoj informacii. 2023. T 79. №2, С.144-153.

12. Leont'ev L. I., Volkov A. I. Sostoyanie i razvitie mineral'no-syr'evoj bazy i produkcii metallurgii dlya obespecheniya importonezavisimosti Rossii // Fiziko-himicheskie osnovy metallurgicheskikh processov (FHOMP 2022). 2022. S. 18-36.

13. Gudima N. V., SHejn YA. P. Kratkij spravochnik po metallurgii cvetnyh metallov. — М.: Metallurgiya, 1975. — 536 s.

14. Utkin N.I. *Proizvodstvo cvetnyh metallov.* – М.: Internet Inzhiniring, 2004. – 442 s.
15. Sadyhov G. B. *Fundamental'nye problemy i perspektivy ispol'zovaniya titanovogo syr'ya v Rossii* // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya.* 2020. T. 63. №. 3-4. S. 178-194.
16. Starikov A.I., Vedeshkin M.V., Monetov G.V. *Mirovoj i otechestvennyj opyt pererabotki titansoderzhashchego zhelezorudnogo syr'ya* // *Problemy kompleksnoj pererabotki titanomagnetitov YUzhnogo Urala.* – Magnitogorsk: Magnitogorskij dom pechaty. 2001. S. 35-47.
17. Smirnov K. I., Gamov P. A., Samolin V.S., Roshchin V. E. *Selektivnoe vosstanovlenie zheleza iz il'menitovogo koncentrata* // *CHernye metally.* 2024. № 6. S. 10-16.
18. Kubashevskij O., Olkock K. B. *Metallurgicheskaya termohimiya.* — М.: Metallurgiya, 1982. — 392 s.

ИЛЬМЕНИТ КОНЦЕНТРАТЫНАН ТЕМІРДІ КӨМІРТЕКПЕН НЕМЕСЕ СУТЕКПЕН СЕЛЕКТИВТІ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ КЕЗІНДЕГІ ЭНЕРГИЯ ШЫҒЫНЫН САЛЫСТЫРУ

СМИРНОВ К.И. 

Смирнов Константин Игоревич – Техника ғылымдарының кандидаты, «Металлургиядағы сутегі технологиялары» ғылыми қызметкері, Оңтүстік Орал мемлекеттік университеті (ҒЗУ), Челябинск қ., Ресей Федерациясы
E-mail: smirnovk@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3678-2636>

Аңдатпа. Негізгі пирометаллургиялық әдістерге бірсатылы электрбалқыту және «құбырлы пеш – балқыту агрегаты» сұлбасы бойынша екісатылы әдіс жатады. Екі өңдеу сұлбасы да көміртекті тотықсыздандырғыш ретінде қолдануды көздейді, бұл өз кезегінде металл темір өнімдерінің және аносовит – Ti_3O_5 негізіндегі титан оксидтері концентратының түзілуіне алып келеді. Ильменит концентратын тотықсыздандырушы күйдіру оның құрамындағы темірді көміртекпен де, сутекпен де селективті түрде тотықсыздандыруға мүмкіндік береді, нәтижесінде жұмсақ темір және рутил құрылымды титан оксидтері концентраты – TiO_2 алынады. 1300 °C температурада ильмениттен темірді карботермиялық тотықсыздандыру процесінің келесі реакция бойынша жүретіні көрсетілген: $3FeTiO_3 + 4C = 3Fe + Ti_3O_5 + 4CO$. 900 °C температурада ильмениттен темірді көміртекпен және сутекпен тотықсыздандыру келесі реакциялар бойынша өтеді: $FeTiO_3 + C = Fe + TiO_2 + CO$, $FeTiO_3 + H_2 = Fe + TiO_2 + H_2O$. 1300 °C және 900 °C температурадағы карботермиялық тотықсыздандыру реакциялары мен 900 °C температурадағы сутектік тотықсыздандыру реакциясы үшін энергия шығындарын есептеу нәтижелері ұсынылған. Есептеу нәтижелері бойынша ең аз шығын 900 °C температурада темірді сутекпен тотықсыздандыру кезінде тіркеліп, ол 215,81 кДж-ты құрайды. Сол температурада көміртекпен тотықсыздандыру кезінде жалпы энергия шығындары 341,29 кДж болды. Ильмениттің көміртекпен өзара әрекеттесу реакциясының 1300 °C температурадағы жалпы энергия шығындары 484,51 кДж құрады. Есептеу нәтижелерін салыстырғанда 900 °C температурада темірді сутекпен тотықсыздандыру сол температурадағы карботермиялық тотықсыздандыруға қарағанда 1,58 есе аз шығынды, ал 1300 °C температурадағы карботермиялық тотықсыздандыруға қарағанда 2,25 есе азырақ екені анықталды. 1300 °C температурадағы карботермиялық тотықсыздандыру шихтаны жоғары температураға дейін қыздыруға және титанның жартылай төменгі оксидке — аносовитке (Ti_3O_5) — дейін тотықсыздануына байланысты одан да көп энергияны талап етеді.

Түйін сөздер: ильменит, карботермиялық тотықсыздану, сутегімен тотықсыздану, қатты фазалық тотықсыздану, темір, титан диоксиді, рутил, аносовит.

COMPARISON OF ENERGY CONSUMPTION IN THE SELECTIVE REDUCTION OF IRON FROM ILMENITE CONCENTRATE USING CARBON OR HYDROGEN

SMIRNOV K.I. 

Smirnov Konstantin Igorevich – Candidate of technical sciences, researcher at the research institute «Hydrogen technologies in metallurgy», South Ural State University (NIU), Chelyabinsk, Russian Federation
E-mail: smirnovk@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3678-2636>

Abstract. The main pyrometallurgical methods are one-stage electric smelting and the two-stage process according to the «tubular furnace – smelting unit» scheme. Both processing routes involve the use of carbon as a reducing agent, which in turn leads to the formation of metallic iron products and a titanium oxide concentrate based on anosovite – Ti_3O_5 . The reduction roasting of ilmenite concentrate makes it possible to selectively reduce iron from ilmenite concentrate using both carbon and hydrogen, resulting in soft iron and a titanium oxide concentrate with a rutile structure – TiO_2 . It has been shown that the process of carbothermic reduction of iron from ilmenite at 1300 °C proceeds according to the reaction: $3\text{FeTiO}_3 + 4\text{C} = 3\text{Fe} + \text{Ti}_3\text{O}_5 + 4\text{CO}$. At a temperature of 900 °C, the reduction of iron from ilmenite with carbon and hydrogen proceeds according to the reactions: $\text{FeTiO}_3 + \text{C} = \text{Fe} + \text{TiO}_2 + \text{CO}$, $\text{FeTiO}_3 + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. The results of energy consumption calculations are presented for the carbothermic reduction reactions at 1300 °C and 900 °C, as well as for the hydrogen reduction at 900 °C. According to the calculations, the lowest energy consumption is observed during the reduction of iron with hydrogen at 900 °C, amounting to 215.81 kJ. At the same temperature, the total energy consumption for carbon reduction is 341.29 kJ. The total energy consumption for the reaction of ilmenite with carbon at 1300 °C amounts to 484.51 kJ. A comparison of the calculation results shows that the reduction of iron with hydrogen at 900 °C is 1.58 times less energy-intensive than carbothermic reduction at the same temperature, and 2.25 times less energy-intensive than carbothermic reduction at 1300 °C. The carbothermic reduction of iron at 1300 °C requires even greater energy expenditure due to heating the charge to a higher temperature and the partial reduction of titanium to a lower oxide – anosovite (Ti_3O_5).

Key words: Ilmenite, carbothermic reduction, hydrogen reduction, solid-phase reduction, iron, titanium dioxide, rutile, anosovite.