



Краткое сообщение

УДК 544.32

DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-211-213



## ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОКСИДОВ В СРЕДЕ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА

В. И. Бердников<sup>1</sup>, Ю. А. Гудим<sup>2</sup><sup>1</sup> ООО Промышленная компания «Технология металлов» (Россия, 454018, Челябинск, ул. Косарева, 63, офис 486)<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

**Аннотация.** Моделирование химического процесса, возникающего при термическом контакте гематита с монооксидом углерода, проводили посредством программного комплекса Терра. При этом мольное соотношение компонентов CO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> варьировалось в пределах 1 – 15, а температура процесса – в диапазоне 25 – 1500 °С. Монооксид углерода при обычной температуре разлагается практически полностью с образованием углерода и диоксида углерода (реакция Белла-Будуара). Этот углерод при повышении температуры процесса последовательно участвует в формировании фаз магнетита, железа и цементита, а диоксид углерода – при образовании вюститита и при обезуглероживании железа. Непосредственное участие монооксида углерода в роли реагента-восстановителя в локальных химических реакциях этого процесса не установлено.

**Ключевые слова:** химическая реакция, оксиды железа, монооксид углерода, термодинамическая система, моделирование процесса

**Для цитирования:** Бердников В.И., Гудим Ю.А. Химические реакции при восстановлении железа из оксидов в среде монооксида углерода // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 211–213. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-211-213>

Short report

## CHEMICAL REACTIONS DURING IRON REDUCTION FROM OXIDES IN CARBON MONOXIDE ENVIRONMENT

V. I. Berdnikov<sup>1</sup>, Yu. A. Gudim<sup>2</sup><sup>1</sup> LLC Industrial Company “Technology of Metals” (63 Kosareva Str., Chelyabinsk 454018, Russian Federation)<sup>2</sup> South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

**Abstract.** The chemical process appearing at thermal contact of hematite with carbon monoxide was modeled using TERRA software package. In this case, the molar ratio of CO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> components varied in the range of 1 – 15, and the process temperature – in the range of 25 – 1500 °C. Carbon monoxide at normal temperature decomposes almost completely to form carbon and carbon dioxide (the Bell-Boudoir reaction). When the process temperature increases, this carbon consistently participates in formation of the phases of magnetite, iron and cementite, and carbon dioxide participates in wüstite formation and in iron decarburization. The carbon monoxide does not directly participate as a reducing reagent in local chemical reactions of this process.

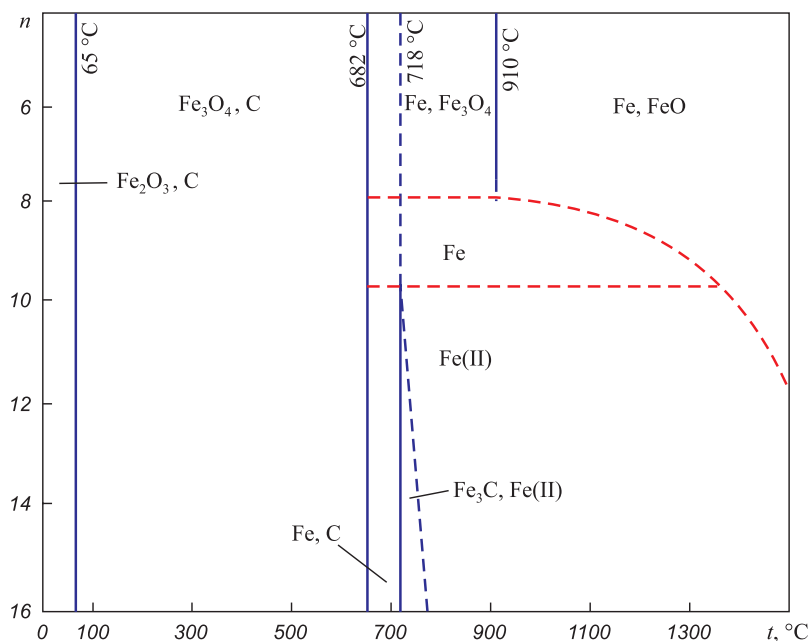
**Keywords:** chemical reaction, iron oxides, carbon monoxide, thermodynamic system, process modeling

**For citation:** Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Chemical reactions during iron reduction from oxides in carbon monoxide environment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 211–213. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-211-213>

Газовая фаза в доменных печах и в агрегатах, работающих по технологии CUREX или MIDREX, содержит в своем составе значительное количество монооксида углерода CO [1 – 3]. Однако существующая информация о роли его в процессе восстановления железа крайне противоречива. Поэтому было решено провести термодинамический анализ системы Fe–O–C = {2, 3 + n, n}, имитирующей пребывание одного моля гематита в газовой среде, изначально содержащей n молей CO. Итоговое балансовое уравнение такого процесса будет иметь вид:

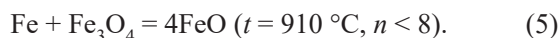
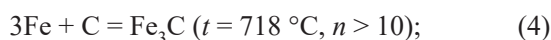
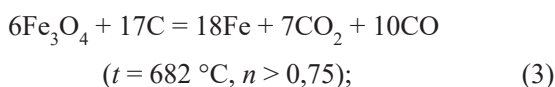


Локальные химические реакции, происходящие в диапазоне температур 25 – 1500 °С, устанавливали по методике, изложенной в работе [4]. Расчеты вели с использованием программного комплекса Терра [5]. Полученные результаты обобщали диаграммой в координатах n – t (см. рисунок). Сплошные линии на диаграмме указывают на места прохождения четырех невариантных химических реакций при фиксированных температурах процесса:

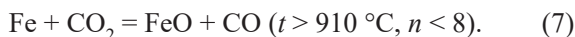


Формирование конденсированных компонентов в системе Fe–O–C

Formation of condensed components in the Fe–O–C system

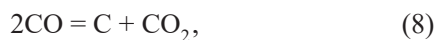


Штриховыми линиями на диаграмме ограничены области действия двух моновариантных химических реакций:



При этом вторично восстанавливаемое по реакции (6) железо Fe(II) сохраняет в виде твердого раствора часть цементита (формирование чугуна).

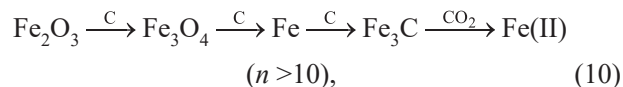
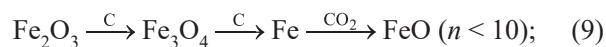
Монооксид углерода начинает разлагаться при температуре ниже 701 °C [4] (или при  $t < 696 \text{ }^\circ\text{C}$  [6]) по реакции



обеспечивая тем самым поставку «сажистого» углерода на исполнение реакций (2) и (3). Реальная температура реакции (2) по кинетическим условиям будет выше расчетной. Расчетная температура реакции (3) подтверждается данными работы [6], а факт прямого восстановления железа, минуя образование вюстита, допускается

также и авторами монографии [1]. Другой продукт реакций (8), (2) и (3), диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , при температурах выше 700 °C становится реагентом в реакциях (6) и (7), создавая тем самым вторичное окисление ранее восстановленных продуктов. И только реакция (5) осуществляется независимо от результатов протекания реакции (8).

Таким образом, в диапазоне температур 25 – 1500 °C последовательно проходят реакции восстановительного и окислительного типа по схемам:



где символами над стрелками указаны вторые реагенты соответствующих реакций.

Предположение о последовательном восстановлении железа по схеме  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$  (принцип А.А. Байкова [1]) подтверждается лишь при варьировании расхода монооксида углерода:

$n$	0,5	1	2–3	4–12	$\geq 13$
Фазы при 1500 °C	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\text{Fe}_3\text{O}_4, \text{FeO}$	$\text{FeO}$	$\text{FeO}, \text{Fe}$	$\text{Fe}$

## Выводы

Частичное восстановление железа из гематита в среде монооксида углерода должно происходить при исходных соотношениях компонентов  $n = \text{CO}/\text{Fe}_3\text{O}_4 = 4 \div 12$ , а полное – при  $n \geq 13$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. М.: ИКЦ Академкнига, 2005. 768 с.
2. Zhou X.L., Du Z.N. The introduction of COREX process development // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 774–776. P. 1430–1433. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1430>
3. Mouer A. *Direct from MIDREX*. 2<sup>nd</sup> Quarter. 2009. P. 3–9.
4. Бердников В.И., Гудим Ю.А. Химические реакции в процессах газификации углерода // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 9. С. 705–712. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-705-712>
5. Трусов Б.Г. База данных и программный комплекс TERRA, редакция 6.3 (электронный ресурс). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
6. Михайлов Г.Г., Кузнецов Ю.С., Качурина О.И., Чернуха А.С. Анализ фазовых равновесий в системе «оксиды железа–углерод–CO–CO<sub>2</sub>» // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2013. Т. 13. № 1. С. 6–13.
1. Voskoboinikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *General Metallurgy*. Moscow: IKTs Akademkniga, 2005, 768 p. (In Russ.).
2. Zhou X.L., Du Z.N. The introduction of COREX process development. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 774-776, pp. 1430–1433. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1430>
3. Mouer A. *Direct from MIDREX*. 2<sup>nd</sup> Quarter. 2009, pp. 3–9.
4. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Chemical reactions in processes of carbon gasification. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 9, pp. 705–712. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-705-712>
5. Trusov B.G. *Database and Program Complex TERRA, edition 6.3*. [Electronic resource]. Moscow: Bauman STU, 2013. (In Russ.).
6. Mikhailov G.G., Kuznetsov Yu.S., Kachurina O.I., Chernukha A.S. Analysis of phase equilibriums in the system “iron oxides–carbon–CO–CO<sub>2</sub>”. *Vestnik JuUrGU. Seriya Metallurgiya*. 2013, vol. 13, no. 1, pp. 6–13. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виктор Иванович Бердников**, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник, ООО Промышленная компания «Технология металлов»

**E-mail:** [berdnikov-chel@mail.ru](mailto:berdnikov-chel@mail.ru)

**Юрий Александрович Гудим**, д.т.н., профессор, Южно-Уральский государственный университет

**Viktor I. Berdnikov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Senior Researcher, LLC Industrial Company “Technology of Metals”

**E-mail:** [berdnikov-chel@mail.ru](mailto:berdnikov-chel@mail.ru)

**Yurii A. Gudim**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University

Поступила в редакцию 27.06.2020

После доработки 27.06.2020

Принята к публикации 26.02.2021

Received 27.06.2020

Revised 27.06.2020

Accepted 26.02.2021