



Оригинальная статья

УДК 553.3

DOI 10.17073/0368-0797-2021-10-761-767



## РАЗДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВОЙ РУДЫ БЕСКОНТАКТНЫМ И КОНТАКТНЫМ КАРБОТЕРМИЧЕСКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ

Н. Косдаулетов<sup>1</sup>, Е. К. Мухамбетгалиев<sup>2</sup>, В. Е. Рошин<sup>1</sup><sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ) (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)<sup>2</sup> Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (Республика Казахстан, 100009, Караганда, ул. Ермакова, 63)

**Аннотация.** Экспериментально подтверждена возможность совместного селективного твердофазного восстановления железа и фосфора в железомарганцевой руде. Эксперименты проведены в лабораторной печи Таммана при температуре 1000 °С и выдержке в течение 2 и 5 ч. Приведены результаты исследования фазового состава и соотношения количества фаз продуктов восстановления, а также их химического состава. Установлено, что при восстановительном обжиге в атмосфере СО обеспечивается переход из оксидной фазы в металлическую только железа и фосфора. При этом в оксидной фазе руды повышается концентрация оксида марганца MnO. Использование в качестве восстановителя твердого углерода в этих же условиях приводит к переходу в металлическую фазу вместе с железом и фосфором части марганца. Исходя из полученных данных предлагается селективное восстановление железа и фосфора проводить при температуре 1000 °С восстановительным газом. Газовое восстановление позволит использовать для металлизации железа и фосфора в железомарганцевой руде существующие газовые, в частности, многоподовые печи, а в качестве восстановителя и энергоносителя – природный газ, в том числе обогащенный водородом, и даже чистый водород. Благодаря этому на стадии металлизации руды при производстве марганцевых сплавов могут быть уменьшены выбросы парникового газа CO<sub>2</sub>. Результаты работы могут быть использованы при разработке теоретических и технологических основ переработки железомарганцевых руд с повышенным содержанием фосфора, которые существующими технологиями не перерабатываются.

**Ключевые слова:** железомарганцевая руда, марганец, ферромарганец, фосфор, железо, концентрат, карботермическое прямое и косвенное восстановление, температура восстановления

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90112, а также при финансовой поддержке РФФИ и Челябинской области в рамках научного проекта № 20-48-740034.

**Для цитирования:** Косдаулетов Н., Мухамбетгалиев Е.К., Рошин В.Е. Разделение компонентов железомарганцевой руды бесконтактным и контактными карботермическим восстановлением // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 10. С. 761–767.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-761-767>

Original article

## SEPARATION OF FERROMANGANESE ORE COMPONENTS BY NON-CONTACT AND CONTACT CARBOTHERMIC REDUCTION

N. Kosdauletov<sup>1</sup>, E. K. Mukhambetgaliev<sup>2</sup>, V. E. Roshchin<sup>1</sup><sup>1</sup> South Ural State University (NRU) (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)<sup>2</sup> Abishev Chemical-Metallurgical Institute (63 Ermekova Str., Karaganda 100009, Republic of Kazakhstan)

**Abstract.** The possibility of joint selective solid-phase reduction of iron and phosphorus in ferromanganese ore has been experimentally confirmed. The experiments were carried out in a Tamman laboratory furnace at a temperature of 1000 °C and holding for two and five hours. The article presents results of the study of phase composition and phases' quantitative ratio of the reduction products, as well as chemical composition of the phases. It was established that reduction roasting in CO atmosphere provides a transition from oxide phase to metal phase only of iron and phosphorus. At the same time, the concentration of manganese oxide MnO increases in the ore oxide phase. The use of solid carbon as a reducing agent under the same conditions leads to transition to the metallic phase together with iron and phosphorus of a part of manganese. Based on the obtained data, it is proposed to selectively reduce iron and phosphorus at a temperature of 1000 °C with a reducing gas. Gas reduction will make it possible to use existing gas furnaces, in particular, multi-pod furnaces, for metallization of iron and phosphorus in ferromanganese ore, and natural gas, including hydrogen – enriched gas, and even pure hydrogen, as a reducing agent and energy carrier. Due to this, at the stage of ore metallization in production of manganese alloys, greenhouse gas CO<sub>2</sub> emissions can be reduced. The results of the work can be used in the development of theoretical and technological bases for processing ferromanganese ores with a high content of phosphorus, which are not processed by existing technologies.

**Keywords:** ferromanganese ore, manganese, ferromanganese, phosphorus, iron, concentrate, carbothermic direct and indirect reduction, reduction temperature

**Funding:** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, scientific project No. 20-38-90112, and with participation of Chelyabinsk Region (scientific project No. 20-48-740034).

**For citation:** Kosdauletov N., Mukhambetgaliev E.K., Roshchin V.E. Separation of ferromanganese ore components by non-contact and contact carbothermic reduction. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 10, pp. 761–767. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-761-767>

## ВВЕДЕНИЕ

При производстве стали марганец используется в качестве раскислителя, легирующего элемента и десульфуратора [1]. Для промышленности России требуется примерно 670 тыс. т марганцевых ферросплавов в год [2]. Несмотря на наличие на территории России ряда месторождений марганцевых руд, их разработка на промышленном уровне не ведется. Промышленное значение имеют запасы марганцевых руд Усинского месторождения (98,5 млн т), железомарганцевые руды Дурновского месторождения (около 300 тыс. т), Селезеньского месторождения (около 5 млн т), а также Кайгадатского месторождения (32,7 млн т) [2]. Однако эти месторождения России не эксплуатируются, так как руды представлены относительно бедными карбонатными, окисленными и железомарганцевыми рудами с высоким содержанием фосфора.

Для получения углеродистого ферромарганца [3, 4], а также для обогащения бедных железомарганцевых руд [5 – 8] в ряде стран в настоящее время практикуется предварительная металлизация. Изучается процесс дефосфорации высокофосфористых железных руд [9 – 13], проводятся исследования по удалению фосфора и из высокофосфористых марганцевых руд [14 – 16]. Однако большинство работ по дефосфорации марганцевых руд связано с операциями гидрометаллургии.

Пирометаллургический способ дефосфорации марганецсодержащих продуктов, разработанный в институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, не нашел промышленного применения [17, 18]. Главным недостатком процесса является продувка жидкого сплава в электродуговой печи взрывоопасным газом СО, а также большой расход энергии на плавление марганцевой руды или концентрата.

В настоящее время для таких руд существует лишь один способ передела – электроплавка для глубокой дефосфорации с получением низкофосфористого шлака [19]. Эта технологическая схема получения стандартных по фосфору марганцевых ферросплавов до настоящего времени является незаменимым, но весьма неэффективным металлургическим процессом. Главные недостатки этого процесса – высокая энергоемкость и большие потери марганца.

В работе [20] было выполнено термодинамическое моделирование процесса восстановительного обжига железомарганцевой руды с высоким содержанием фос-

фора в присутствии твердого углерода или в атмосфере СО. Показано, что железо в такой руде восстанавливается и твердым углеродом, и оксидом углерода СО до металлического состояния, а марганец – только до оксида MnO, а степень восстановления фосфора зависит от количества твердого восстановителя и продолжительности обжига в атмосфере СО. Таким образом, для получения концентрата оксидов марганца с низким содержанием железа и фосфора целесообразно проводить предварительную металлизацию руды с использованием относительно слабого газообразного восстановителя и подбирать оптимальное сочетание температуры и продолжительности обжига. Использование в качестве восстановителя газов является актуальной задачей еще и в связи с мировым трендом на отказ от углеродных технологий<sup>1, 2</sup>.

Целью настоящего исследования является сравнение условий совместного селективного твердофазного восстановления железа и фосфора в железомарганцевой руде твердым углеродом и газообразным восстановителем для получения концентрата оксидов марганца.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования использовали железомарганцевую руду Селезеньского месторождения с относительно высоким содержанием железа и фосфора.

Эксперименты проводили в герметизированной печи сопротивления (печь Таммана) с графитовым нагревателем по ранее разработанной методике для твердофазного восстановления металлов [20]. Используя ранее полученные результаты экспериментов с марганцевыми рудами разного генезиса и разными видами восстановителя [21], в качестве оптимальной температуры для восстановления железа и фосфора приняли 1000 °С.

Эксперименты по твердофазному восстановлению железа и фосфора в руде при контакте руды с твердым углеродом и только в газовой фазе проводили одновременно. Для этого в одном эксперименте использовали два реакционных тигля. В один тигель помещали смесь порошка руды и (образующегося в виде стружки при

<sup>1</sup> <https://www.rbc.ru/business/22/07/2020/5f1565589a794712b40faedf>

<sup>2</sup> <https://ecolog29.ru/ehkologiya-i-gosudarstvo/biruzovyyj-zhelytyjj-golubojj-vybirajj-sebe-lyubojj-v-rossii-nachnut-proizvodit-chistyjj-vodorod/>

обточке графитированных электродов) графита фракции  $(-0,4) \div (+0,1)$  мм. Во второй тигель помещали только порошок руды. Для получения восстановительной атмосферы CO печь накрывали крышкой, тигли с реакционными смесями нагревали до температуры 1000 °С и выдерживали в течение 2 или 5 ч. Температуру контролировали вольфрам-рениевой термопарой BP5/BP20 (рис. 1).

После эксперимента по восстановлению печь охлаждали и извлекали тигли. Реакционную смесь руды с твердым углеродом рассеивали для удаления остатков углерода и отбирали образцы для рентгенофазового анализа продуктов восстановления.

Далее раздельно плавил реакционную смесь, полученную в каждом из тиглей, с целью получения металла и шлака. Для этого в рабочее пространство печи сопротивления устанавливали корундовый тигель с обожженной на первой стадии рудой, печь нагревали до температуры плавления обожженной руды и выдерживали примерно 5 мин. После этого печь выключали и охлаждали расплав вместе с печью до комнатной температуры. Полученные образцы продукта плавления заливали эпоксидной смолой, шлифовали и исследовали на оптическом и электронном микроскопах. Химический состав фаз в продуктах плавления определяли микрорентгеноспектральным методом на микроскопе JSM-6460LV фирмы JEOL.

Рентгеноструктурный фазовый анализ образцов после восстановления проводили на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV. Обработку результатов проводили с использованием программного обеспечения «Match». Количественную оценку фазового состава

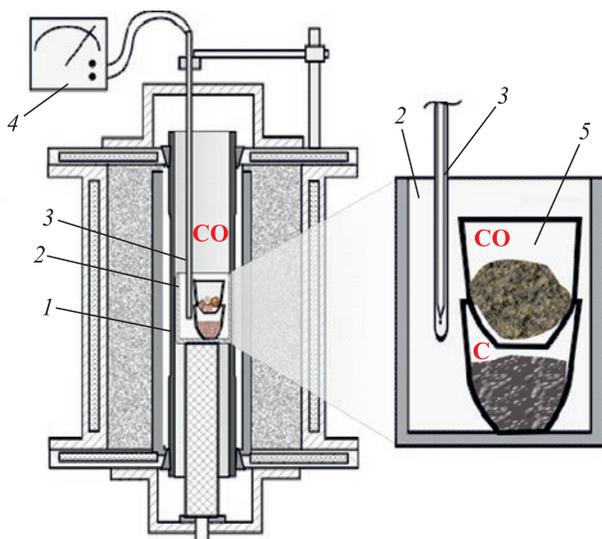


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – нагреватель; 2 – контейнер с тиглями; 3 – термопара; 4 – милливольтметр; 5 – тигли с образцами

Fig. 1. Scheme of the experiment:

1 – heater; 2 – container with crucibles; 3 – thermocouple; 4 – milli-voltmeter; 5 – crucibles with samples

продуктов восстановительного обжига проводили с помощью приложения Rietveld Refinement.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2. приведены дифрактограмма исходной железомарганцевой руды, а также дифрактограммы образцов после восстановительного обжига в атмосфере CO и в контакте с твердым углеродом при температуре 1000 °С после выдержки в течение 5 ч. Дифрактограммы образцов после восстановительного обжига в течение 2 ч не приведены, поскольку состав фаз с изменением продолжительности обжига не изменяется. Можно лишь отметить, что с увеличением продолжительности выдержки в атмосфере CO увеличивается количество фазы Fe<sub>3</sub>P.

Согласно результатам рентгенофазового анализа в исходной руде присутствуют оксиды, карбонаты, гидраты марганца, железа, кремния и кальция, что соответствует типу руды пиролюзит-псиломеланового состава (рис. 2, а). Фосфор в исходной руде сосредоточен в минералах (Fe<sub>1,3</sub>H<sub>2</sub>O<sub>5</sub>P) и (Fe<sub>3</sub>O<sub>7</sub>P).

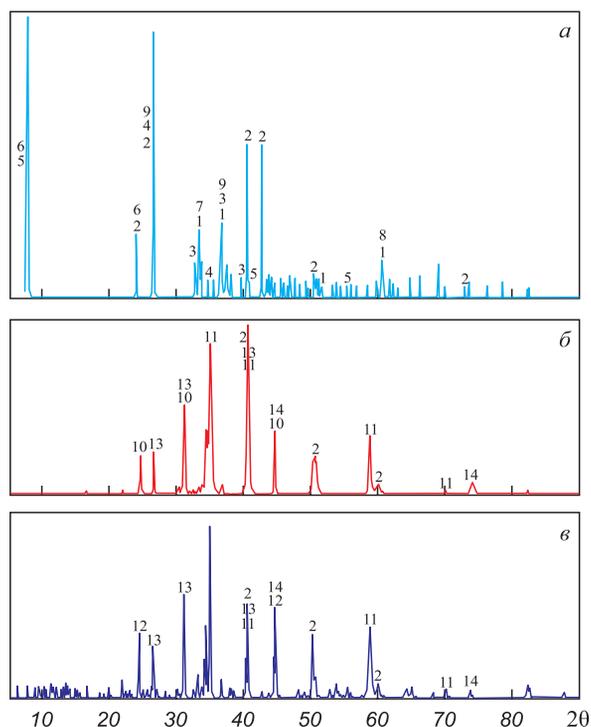


Рис. 2. Дифрактограммы руды в исходном состоянии (а), после обжига в течение 5 ч в атмосфере CO (б) и в контакте с твердым углеродом (в):

1 – MnO<sub>2</sub>; 2 – SiO<sub>2</sub>; 3 – Fe<sub>3</sub>O<sub>7</sub>P; 4 – Fe<sub>1,3</sub>H<sub>2</sub>O<sub>5</sub>P; 5 – CaCO<sub>3</sub>; 6 – FeCO<sub>3</sub>; 7 – Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 8 – MnO·MnO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O; 9 – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10 – (Fe<sub>3</sub>P); 11 – (MnO); 12 – (Fe<sub>0,95</sub>Mn<sub>0,05</sub>); 13 – (Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>); 14 – (Fe)

Fig. 2. Diffractograms of ore in the initial state (а), and after roasting for 5 hours in atmosphere of CO (б) and in contact with solid carbon (в):

1 – MnO<sub>2</sub>; 2 – SiO<sub>2</sub>; 3 – Fe<sub>3</sub>O<sub>7</sub>P; 4 – Fe<sub>1,3</sub>H<sub>2</sub>O<sub>5</sub>P; 5 – CaCO<sub>3</sub>; 6 – FeCO<sub>3</sub>; 7 – Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 8 – MnO·MnO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O; 9 – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10 – (Fe<sub>3</sub>P); 11 – (MnO); 12 – (Fe<sub>0,95</sub>Mn<sub>0,05</sub>); 13 – (Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>); 14 – (Fe)

В результате обжига в атмосфере CO в смеси появились железо  $\alpha$ -Fe, фосфид железа  $Fe_3P$ , оксид марганца MnO, кварцит  $SiO_2$  и тефроит  $Mn_2SiO_4$  (рис. 2, б). В образцах, в которых руда контактировала с твердым углеродом, присутствуют железо ( $\alpha$ -Fe), оксид марганца MnO, кварцит  $SiO_2$ , тефроит  $Mn_2SiO_4$  и сплав железа с марганцем  $Fe_{0,95}Mn_{0,05}$  (рис. 2, в). На дифрактограммах образцов, контактировавших с твердым углеродом, не обнаруживается фосфор. Можно предположить, что фосфор находится в виде раствора в сплаве  $Fe_{0,95}Mn_{0,05}$ .

На рис. 3 представлены результаты определения количества фаз, содержащихся в железомарганцевой руде после восстановительного обжига при температуре 1000 °С. После восстановительного обжига в атмосфере CO с увеличением продолжительности выдержки

содержание  $Mn_2SiO_4$  уменьшается, а содержание MnO увеличивается. В результате увеличения количества восстановленного фосфора растет количество  $Fe_3P$ , а содержание железа уменьшается (рис. 3, а).

После восстановительного обжига с твердым углеродом при этих же условиях увеличение продолжительности выдержки приводит к росту количества фазы  $Mn_2SiO_4$ , а количество фаз MnO и  $SiO_2$  соответственно уменьшается. Образование тефроита  $Mn_2SiO_4$ , по-видимому, затрудняет также восстановление марганца, поскольку при этом уменьшается количество металлического сплава  $Fe_{0,95}Mn_{0,05}$  (рис. 3, б).

Такой характер распределения железа и марганца между фазами подтверждается и картами распределения этих элементов в компонентах продуктов твердофазного восстановления (рис. 4). Видно, что

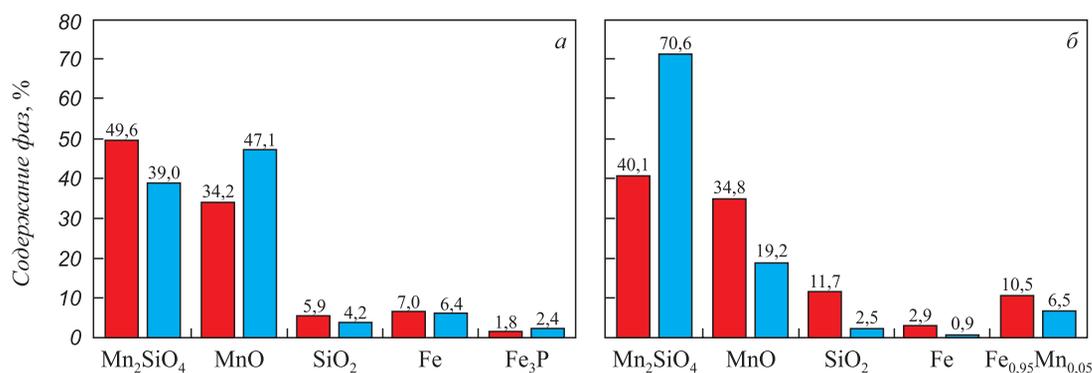


Рис. 3. Результаты анализа количества фаз после восстановительного обжига при температуре 1000 °С в атмосфере CO (а) или с твердым углеродом (б) в течение 2 (■) и 5 ч (■)

Fig. 3. Results of quantitative analysis of the phases after the reduction roasting at a temperature of 1000 °C in an atmosphere with CO (a) or with solid carbon (b) for 2 (■) and 5 hours (■)

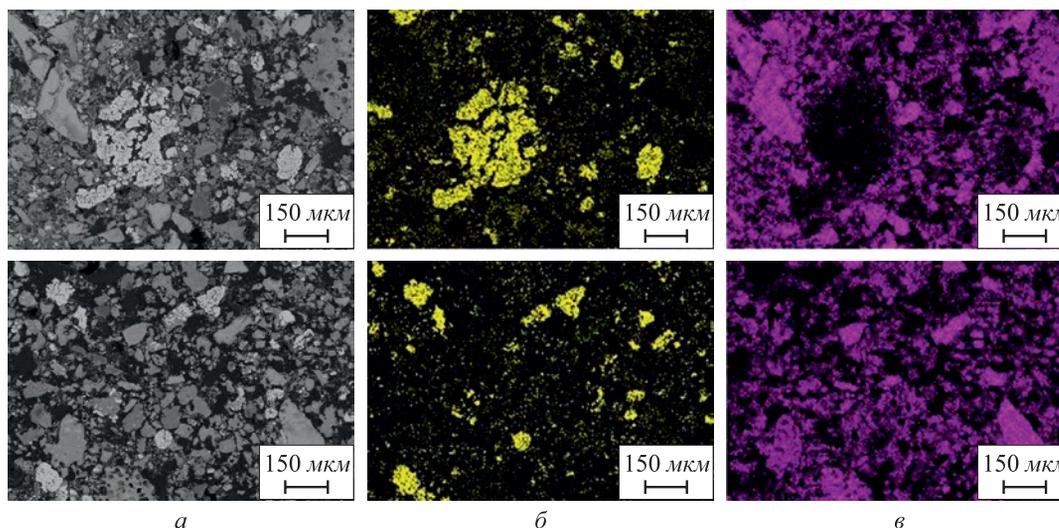


Рис. 4. Карта распределения элементов после восстановления в атмосфере CO (вверху) и в контакте с твердым углеродом (внизу) при 1000 °С в течение 5 ч:

а – электронное изображение; б и в – распределение Fe и Mn

Fig. 4. Map of the elements distribution after reduction in the atmosphere of CO (top) and in contact with solid carbon at 1000 °C for 5 hours:

а – electronic image; б and в – distribution of Fe and Mn

и при восстановлении в атмосфере CO, и при контакте с углеродом практически все железо находится в металлической фазе (рис. 4, б), а марганец сосредоточен вне металлических частиц. Но после восстановления твердым углеродом на картах выявляется присутствие марганца и в некоторых металлических частицах (рис. 4, в). Распределение фосфора на картах выглядит равномерным и не выявляет каких-либо характерных особенностей, что, по-видимому, обусловлено его малой концентрацией. Содержание элементов после восстановления в атмосфере CO и твердым углеродом приведено в табл. 1.

Содержание элементов после восстановления в атмосфере CO и твердым углеродом приведено в табл. 2.

На рис. 5 представлен вид концентратов после плавления. В результате плавления и изотермической выдержки концентрата, полученного восстановлением в атмосфере CO, в тигле образовалась вязкая шлаковая масса, в которой после охлаждения обнаруживаются корольки металла (рис. 5, а). Попытка измельчения и магнитная сепарация продуктов плавки оказались неэффективны, поскольку вместе с металлом магнитным полем извлекается и большое количество шлака.

Концентрат, полученный восстановлением углеродом, разделяется на металл и шлак (рис. 5, б). Согласно результатам анализа шлак состоит из оксидов марганца, кремния, алюминия и кальция. Преобладающими

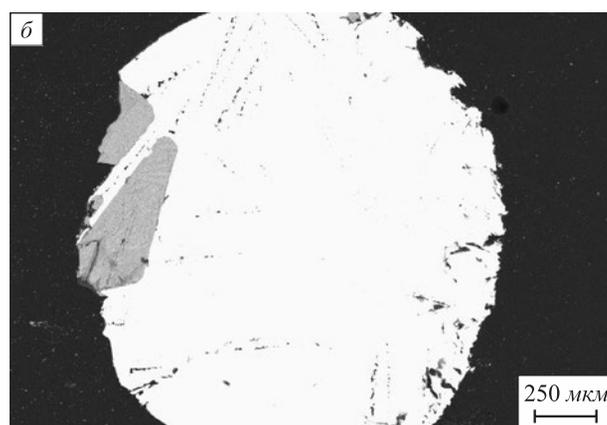
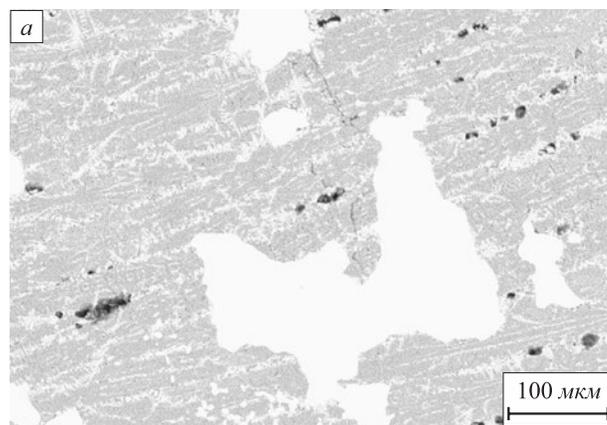


Рис. 5. Шлак и металл после плавления восстановленного в атмосфере CO в течение 5 ч концентрата (а) и восстановленный твердым углеродом металл в концентрате после восстановления в течение 5 ч (б)

Fig. 5. Slag and metal after melting of the concentrate reduced in the atmosphere of CO for 5 hours (a) and the metal reduced by solid carbon in the concentrate after reduction for 5 hours (b)

Т а б л и ц а 1

**Содержание элементов после восстановления в атмосфере CO и твердым углеродом**

Table 1. Content of the elements after reduction in atmosphere of CO and by solid carbon

Элемент	Содержание, (ат. %), элементов						
	O	Al	Si	P	Mn	Fe	Ba
CO	30	1,8	13,6	0,1	29,6	22,6	2,1
C <sub>тв</sub>	33	1,7	13,0	0,2	35,1	14,6	2,7

Т а б л и ц а 2

**Содержание элементов после восстановления в атмосфере CO и твердым углеродом**

Table 2. Content of the elements after reduction in atmosphere of CO and by solid carbon

Точка анализа	Содержание, (ат. %), элементов							
	O	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe	Cu
Площадь 1	0	0	0	0,1	0	0	97,4	2,5
Площадь 2	66	0,3	12,0	0	0,4	17,5	4,2	0
Площадь 3	65	1,6	13,2	0	0,9	18,9	0,3	0
Площадь 4	0	0	0	1,7	0	11,5	86,8	0

оксидами шлака являются оксиды марганца. Металл содержит железо, марганец и фосфор.

**Выводы**

Восстановление газообразным оксидом углерода CO при температуре 1000 °C позволяет перевести железо и фосфор в металлическую фазу при практически полном сохранении марганца в составе оксидной фазы. Использование в качестве восстановителя твердого углерода ведет к переходу в металлическую фазу вместе с железом и фосфором также заметного количества марганца даже при относительно низкой (1000 °C) температуре восстановления.

Селективное восстановление железа и фосфора восстановительным газом при температуре 1000 °C позволяет использовать в качестве восстановителя и энергоносителя природный газ, в том числе обогащенный водородом, или даже чистый водород, и уменьшить тем самым углеродный эквивалент, а для металлизации железа в железомарганцевой руде можно использовать существующие газовые, в частности, многоподовые печи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Дашевский В.Я., Александров А.А., Жучков В.И., Леонтьев Л.И. Проблема марганца в российской металлургии // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 8. С. 579–590. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-579-590>
1. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I. Problem of manganese in the Russian metallurgy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 8, pp. 579–590. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-579-590>
2. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 5. С. 344–350. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-344-350>
2. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Edil'baev A.I., Edil'baev B.A. Manganese ores of the Kemerovo Region-Kuzbass and methods of their enrichment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 5, pp. 344–350. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-344-350>
3. Kononov R., Ostrovski O., Ganguly S. Carbothermal solid state reduction of manganese ores: 3. Phase development // *ISIJ International*. 2009. Vol. 49. No. 8. P. 1115–1122. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1115>
3. Kononov R., Ostrovski O., Ganguly S. Carbothermal solid state reduction of manganese ores: 3. Phase development. *ISIJ International*. 2009, vol. 49, no. 8, pp. 1115–1122. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1115>
4. Chen J., Tian P.F., Song X.A., Li N., Zhou J.X. Microstructure of solid phase reduction on manganese oxide ore fines containing coal by microwave heating // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17. No. 3. P. 13–20. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60066-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60066-0)
4. Chen J., Tian P.F., Song X.A., Li N., Zhou J.X. Microstructure of solid phase reduction on manganese oxide ore fines containing coal by microwave heating. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010, vol. 17, no. 3, pp. 13–20. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60066-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60066-0)
5. Yuan S., Zhou W., Han Y., Li Y. Separation of manganese and iron for low-grade ferromanganese ore via fluidization magnetization roasting and magnetic separation technology // *Minerals Engineering*. 2020. Vol. 152. Article 106359. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106359>
5. Yuan S., Zhou W., Han Y., Li Y. Separation of manganese and iron for low-grade ferromanganese ore via fluidization magnetization roasting and magnetic separation technology. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, article 106359. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106359>
6. Gao L., Liu Z., Pan Y., Feng C., Ge Y., Chu M. A study on separation of Mn and Fe from high-alumina ferruginous manganese ores by the carbothermal roasting reduction process // *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31. No. 1. P. 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.09.036>
6. Gao L., Liu Z., Pan Y., Feng C., Ge Y., Chu M. A study on separation of Mn and Fe from high-alumina ferruginous manganese ores by the carbothermal roasting reduction process. *Advanced Powder Technology*. 2020, vol. 31, no. 1, pp. 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.09.036>
7. Liu B., Zhang Y., Su Z., Lu M., Peng Z., Li G., Jiang T. Formation mechanism of  $Mn_xFe_{3-x}O_4$  by solid-state reaction of  $MnO_2$  and  $Fe_2O_3$  in air atmosphere: morphologies and properties evolution // *Powder Technology*. 2017. Vol. 313. P. 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.012>
7. Liu B., Zhang Y., Su Z., Lu M., Peng Z., Li G., Jiang T. Formation mechanism of  $Mn_xFe_{3-x}O_4$  by solid-state reaction of  $MnO_2$  and  $Fe_2O_3$  in air atmosphere: morphologies and properties evolution. *Powder Technology*. 2017, vol. 313, pp. 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.012>
8. Liu B., Zhang Y., Wang J., Wang J., Su Z., Li G., Jiang T. New understanding on separation of Mn and Fe from ferruginous manganese ores by the magnetic reduction roasting process // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 444. P. 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.234>
8. Liu B., Zhang Y., Wang J., Wang J., Su Z., Li G., Jiang T. New understanding on separation of Mn and Fe from ferruginous manganese ores by the magnetic reduction roasting process. *Applied Surface Science*. 2018, vol. 444, pp. 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.234>
9. Gao P., Sun Y.S., Ren D.Z., Han Y.X. Growth of metallic iron particles during coal-based reduction of a rare earths-bearing iron ore // *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2013. Vol. 30. P. 74–78. <https://doi.org/10.1007/bf03402343>
9. Gao P., Sun Y.S., Ren D.Z., Han Y.X. Growth of metallic iron particles during coal-based reduction of a rare earths-bearing iron ore. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2013, vol. 30, pp. 74–78. <https://doi.org/10.1007/bf03402343>
10. Li Y.J., Sun Y.S., Han Y.X., Gao P. Coal-based reduction mechanism of low-grade laterite ore // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013. Vol. 23. P. 3428–3433. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62884-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62884-8)
10. Li Y.J., Sun Y.S., Han Y.X., Gao P. Coal-based reduction mechanism of low-grade laterite ore. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013, vol. 11, pp. 3428–3433. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62884-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62884-8)
11. Tang H.Q., Guo Z.C., Zhao Z.L. Phosphorus removal of high phosphorus iron ore by gas-based reduction and melt separation // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17. No. 9. P. 1–6. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60133-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60133-1)
11. Tang H.Q., Guo Z.C., Zhao Z.L. Phosphorus removal of high phosphorus iron ore by gas-based reduction and melt separation. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010, vol. 17, no. 9, pp. 1–6. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60133-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60133-1)
12. Kim D.-Y., Kim H.-S., Jung S.-M. Production of (Mn, Fe)-carbide containing low phosphorus by carbothermic reduction of Mn oxide and Fe oxide // *ISIJ International*. 2015. Vol. 55. No. 3. P. 504–512. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.504>
12. Kim D.-Y., Kim H.-S., Jung S.-M. Production of (Mn, Fe)-carbide containing low phosphorus by carbothermic reduction of Mn oxide and Fe oxide. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 3, pp. 504–512. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.504>
13. Салихов С.П., Сулеймен Б., Рошин В.Е. Селективное восстановление железа и фосфора из оолитовой руды // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 560–567. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-560-567>
13. Salikhov S.P., Suleimen B., Roshchin V.E. Selective reduction of iron and phosphorus from oolitic ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 7, pp. 560–567. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-560-567>
14. Грошкова А.Л., Полулях Л.А., Травянов А.Я., Дашевский В.Я., Юсфин Ю.С. Распределение фосфора между фазами при выплавке высокоуглеродистого ферромарганца в доменной печи // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 11. С. 12–16.
14. Groshkova A.L., Polulyakh L.A., Travyanov A.Ya., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Distribution of phosphorus between phases during high-carbon ferromanganese smelting in a blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 11, pp. 12–16. (In Russ.).
15. Iwama T., Du Chuan-ming, Gao Xu, Kim S., Ueda S., Kitamura S. Extraction of phosphorus from steelmaking slag by selective leach-
15. Iwama T., Du Chuan-ming, Gao Xu, Kim S., Ueda S., Kitamura S. Extraction of phosphorus from steelmaking slag by selective

- ing using citric acid // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 7. P. 1351–1360.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-658>
16. Shin D.J., Gao X., Ueda S., Kitamura S.Y. Selective recovery of P and Mn from steelmaking slag by carbothermic reduction. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2018. Vol. F10. P. 305–311.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-72138-5\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72138-5_31)
  17. Пат. № 2594997 РФ. Способ дефосфорации марганцевых руд и концентратов / В.Я. Дашевский, Ю.С. Юсфин, Л.А. Полулях и др. Заявл. 26.06.2015; опубл. 20.08.2016. Бюл. № 23.
  18. Дашевский В.Я., Александров А.А., Леонтьев Л.И., Овчинникова Г.А. Марганцевые ферросплавы из отечественных руд. В кн.: Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет. Сборник научных трудов. М.: Интерконтакт Наука, 2018. С. 313–326.
  19. Лякишев Н.П., Гасик М.И., Дашевский В.Я. Металлургия ферросплавов. Ч. 1. Металлургия сплавов кремния, марганца и хрома. М.: Учеба, 2006. 117 с.
  20. Косдаулетов Н., Рошин В.Е. Определение условий селективного восстановления железа из железомарганцевой руды // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 952–959.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-952-959>
  21. Kosdauletov N.Y., Roshchin V.E. Estimation of selective reduction of iron and phosphorus from manganese ores of different genesis // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 966. No. 1. Article 012036.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012036>
- leaching using citric acid. *ISIJ International*. 2018, vol. 58, no. 7, pp. 1351–1360.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-658>
16. Shin D.J., Gao X., Ueda S., Kitamura S.Y. Selective recovery of P and Mn from steelmaking slag by carbothermic reduction. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2018, vol. F10, pp. 305–311.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-72138-5\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72138-5_31)
  17. Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S., Polulyakh L.A., etc. *Method of dephosphorization of manganese ores and concentrates*. Patent no. 2594997 RF. *Bulleten' izobretenii*. 2016, no. 23. (In Russ.).
  18. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Leont'ev L.I., Ovchinnikova G.A. Manganese ferroalloys from domestic ores. In: *A.A. Baikov Institute of Metallurgy of Materials Science of the Russian Academy of Sciences-80 years. Coll. of sci. papers*. Moscow: Interkontakt Nauka, 2018, pp. 313–326. (In Russ.).
  19. Lyakishev N.P., Gasik M.I., Dashevskii V.Ya. *Metallurgy of Ferroalloys. Part 1. Metallurgy of Silicon, Manganese and Chromium Alloys*. Moscow: Ucheba, 2006, 117 p. (In Russ.).
  20. Kosdauletov N., Roshchin V.E. Definition of conditions of selective iron reduction from iron-manganese ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11-12, pp. 952–959. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-952-959>
  21. Kosdauletov N.Y., Roshchin V.E. Estimation of selective reduction of iron and phosphorus from manganese ores of different genesis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 966, no. 1, article 012036.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012036>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Нурлыбай Косдаулетов**, аспирант кафедры пирометаллургических процессов, Южно-Уральский государственный университет  
**ORCID:** 0000-0002-1570-4188  
**E-mail:** kosdauletovn@susu.ru

**Ербол Кенжегалылы Мухамбетгалиев**, ведущий научный сотрудник лаборатории «Металлургические расплавы», Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева  
**ORCID:** 0000-0001-6555-6817  
**E-mail:** ye.kenzhegaliuly@gmail.com

**Василий Ефимович Рошин**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник кафедры пирометаллургических процессов, Южно-Уральский государственный университет  
**ORCID:** 0000-0003-3648-8821  
**E-mail:** roshchinve@susu.ru

**Nurlybai Kosdauletov**, Postgraduate of the Chair "Pyrometallurgical Processes", South Ural State University  
**ORCID:** 0000-0002-1570-4188  
**E-mail:** kosdauletovn@susu.ru

**Erbol K. Mukhambetgaliev**, Leading Researcher of the Laboratory "Metallurgical Alloys", Abishev Chemical-Metallurgical Institute  
**ORCID:** 0000-0001-6555-6817  
**E-mail:** ye.kenzhegaliuly@gmail.com

**Vasilii E. Roshchin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Chair "Pyrometallurgical Processes", South Ural State University  
**ORCID:** 0000-0003-3648-8821  
**E-mail:** roshchinve@susu.ru

Поступила в редакцию 09.03.2021  
После доработки 08.04.2021  
Принята к публикации 12.04.2021

Received 09.03.2021  
Revised 08.04.2021  
Accepted 12.04.2021