

УДК 669.11:669.292.34

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТВЕРДОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В СЛОЕ ИЛЬМЕНитОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Смирнов К.И., аспирант кафедры «Пирометаллургические процессы» (smirnovk@susu.ru)

Гамов П.А., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Пирометаллургические процессы» (gamovpa@susu.ru)

Роцин В.Е., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник кафедры «Пирометаллургические процессы» (roshchinve@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76)

Аннотация. Переработка титаносодержащих руд с извлечением всех основных полезных элементов является актуальной задачей с точки зрения рационального использования полезных ископаемых. Показано, что ни одна из существующих схем переработки не позволяет извлекать из титаносодержащих железных руд одновременно все основные полезные элементы – железо, титан и ванадий. Эту задачу можно решить с использованием селективного извлечения этих элементов на основе новых представлений об электронном механизме восстановления. Экспериментально исследовано распространение процесса твердофазного селективного восстановления железа в глубь слоя зерен ильменитового концентрата от поверхности его контакта с порошком углеродсодержащего материала. Представлены результаты определения количества выделившейся металлической фазы по мере отдаления от границы контакта концентрат – восстановитель. На основе представленных результатов о количестве выделившейся металлической фазы сделан вывод о диффузионных процессах в слое контактирующих только между собой зерен концентрата, лимитирующих процесс восстановления железа. Вблизи плоскости контакта твердого восстановителя со слоем зерен концентрата скорость процессов восстановления железа преобладает над скоростью выделения из ильменита фаз с повышенным содержанием железа. В глубине слоя ильменитового концентрата процессу восстановления железа предшествует выделение из зерен концентрата железосодержащей силикатной фазы, в которой железо восстанавливается раньше, чем в зернах ильменита. Выделение железосодержащей силикатной фазы способствует спеканию зерен ильменита. Сделано заключение, что в слое концентрата, контактирующем со слоем твердого восстановителя, при отсутствии контакта каждого зерна ильменита с твердым восстановителем точечный контакт зерен и наличие в слое пустот между зернами не препятствуют распространению процесса восстановления в слое контактирующих только между собой зерен.

Ключевые слова: ильменит, титаномагнетит, предварительное восстановление, карботермическое восстановление, распространение процесса восстановления, металлическая фаза, комплексный оксид.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-116-121

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все больше проявляется интерес к исследованию твердофазного восстановления металлов из железных [1, 2], хромовых [3 – 5], марганцевых [6, 7], а также титаномагнетитовых и ильменитовых руд [8 – 11]. Титаномагнетитовые и ильменитовые руды являются перспективным сырьем для производства железа, титана и ванадия. В Российской Федерации на их долю приходится 13 % запасов железных руд, 48 % запасов титана в виде TiO_2 и 92 % запасов ванадия в виде V_2O_5 .

Переработку титаномагнетитовых и ильменитовых руд ведут гидрометаллургическим или пирометаллургическим методами. Гидрометаллургический метод, основанный на операции хлорирования, пригоден только для руд и концентратов с высоким содержанием оксидов титана, при этом получают концентрат оксида титана TiO_2 и малоиспользуемые соли железа и ванадия [12, 13]. Гидрометаллургический метод ис-

пользуют также для очистки высокотитанистого шлака после переработки пирометаллургическим методом с выделением концентрата оксида титана TiO_2 . Пирометаллургические методы нацелены в основном на извлечение железа. Переработка по классической схеме в доменной печи ограничивается максимальным содержанием оксидов титана 20 – 25 %; при более высоком содержании оксидов титана возникают сложности в работе печи [14, 17]. Переработка низкотитанистых титаномагнетитовых руд освоена в доменных печах на Нижнетагильском металлургическом комбинате. Одностадийная плавка в рудотермических печах позволяет получать чугун и концентрат оксидов титана, при этом в шлаке оставляют около 10 % оксидов железа для предотвращения восстановления титана и последующего образования его карбидов. Другие методы пирометаллургической переработки (например, по схеме Iron making technology mark three – ITmk 3) требуют разбавления шлака до состава, соответствующего доменным шлакам [15]. При этом образование большого

количества шлака приводит к увеличению энергетических затрат, связанных с плавлением, а также потерей титана и ванадия вместе со шлаком. Двухстадийная переработка предполагает селективное извлечение железа из титаномагнетитового или ильменитового концентрата: предвосстановление в трубчатой вращающейся печи и последующее разделение на первородное железо и концентрат оксидов титана и ванадия в дуговой сталеплавильной печи [18, 19]. Но этот метод имеет ограничения по температуре плавления используемого материала вследствие определенных условий работы печи.

Использование неподготовленной титаномагнетитовой руды по существующим пирометаллургическим схемам требует предварительного выделения основного минерала руды. Технологическая схема подготовки ильменитовых руд с получением из них концентратов предполагает много стадий обогащения: дробление; измельчение до размеров частиц, достаточных для разделения рудных и нерудных минералов с последующей многостадийной магнитной сепарацией [17]. Полученный концентрат в дальнейшем подвергают окомкованию дисперсных рудных минералов. Окомкование ильменитовых концентратов совместно с восстановителем нежелательно, так как при последующем разделении на металл и высокотитанистый шлак непрореагировавший углерод восстанавливает титан с образованием карбидов, а зола восстановителя растворяется в шлаке, снижая концентрацию оксида титана TiO_2 .

Таким образом, при переработке титансодержащих руд желательнее использовать твердый восстановитель без включения его в окомкованный концентрат. Согласно электронной теории восстановления металлов [20 – 22] можно ожидать, что твердофазное восстановление в окомкованном концентрате может происходить и без контакта каждой частицы концентрата с твердым восстановителем. При этом, как было показано в работах [21, 22], ни границы оксидных кристаллов, ни трещины и даже пустоты в оксидах не должны быть непреодолимыми препятствиями для движения вакансий и электронов по общей для всех катионов анионной подрешетке.

Целью настоящей работы является исследование распространения восстановительного процесса в слое зерен ильменитового концентрата по мере удаления от границы контакта со слоем твердого восстановителя.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве материала для проведения экспериментов использовали ильменитовый концентрат следующего состава, % (по массе): 46,20 TiO_2 , 16,45 Fe_2O_3 , 34,20 FeO , 0,42 Al_2O_3 , 0,89 SiO_2 , 0,015 P_2O_5 , 0,24 V_2O_5 .

В кварцевую запаянную с одной стороны трубку (пробирку) внутренним диам. 6 мм насыпали ильме-

нитовый концентрат на высоту 35 мм. Сверху на концентрат засыпали порошок размолотого графита от графитированных электродов дуговых сталеплавильных печей (рис. 1). Для определения влияния на процесс восстановления железа газового восстановителя в виде образующегося в условиях эксперимента оксида углерода CO в одном из образцов на участке 5 – 7 мм от плоскости контакта твердого восстановителя и ильменита часть ильменита заменяли прослойкой шириной 2 мм из порошка кварцевого стекла. Пробирку с шихтой помещали в рабочее пространство муфельной печи, нагревали до температуры 1250 °С и выдерживали при этой температуре в течение 60, 120, 180, 240 и 480 мин.

После выдержки печь отключали, образцы охлаждали вместе с печью до комнатной температуры. Образцы вынимали из кварцевой трубки, готовили шлиф и исследовали его на оптическом и электронном сканирующем микроскопах. Состав фаз определяли микрорентгено-спектральным методом на микроскопе JSM-6460LV фирмы JEOL.

Для определения количества восстановленного металла выделили одиннадцать областей по мере удаления их от границы контакта ильменитового концентрата и графита. Высота каждой области составляла 1 мм. Первые десять областей предоставляли информацию

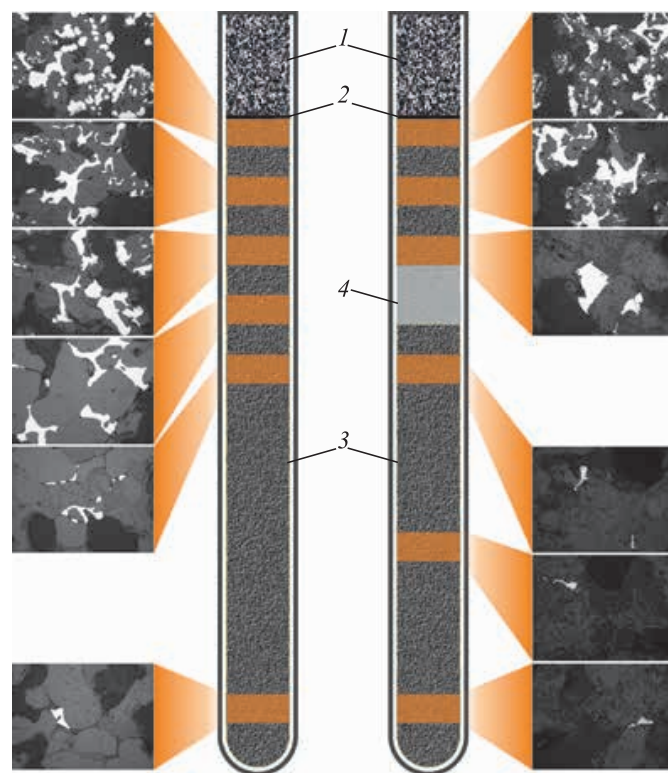


Рис. 1. Схема и результаты эксперимента:
1 – графит; 2 – ильменит; 3 – кварцевая пробирка;
4 – кварцевое стекло

Fig. 1. Scheme and results of the experiment:
1 – graphite; 2 – ilmenite; 3 – quartz test tube; 4 – quartz glass

о восстановлении металла на расстоянии до 10 мм от границы контакта концентрата и восстановителя, а одиннадцатая область – на расстоянии 30 мм. Подсчет количества металлической фазы проводили с использованием программного комплекса «Analysis»: для этого на поверхности продольного шлифа выделяли металлическую и оксидную фазы. Подсчитывали отношение площади, занимаемой металлической фазой, к общей площади, занимаемой металлической и оксидной фазами. Таким приемом исключали площадь шлифа, занимаемую пустотами между зернами концентрата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате восстановления в зернах ильменита по всей высоте образца произошло выделение металлической фазы. При этом, как и следовало ожидать, максимальное количество металла образовалось вблизи плоскости контакта восстановителя и ильменита. Площадь, занимаемая металлом, постепенно уменьшалась по мере удаления от плоскости контакта.

В образце с прослойкой из кварцевого стекла вблизи контакта ильменита и восстановителя до слоя стекла количество и распределение металлической фазы аналогичны этим параметрам в образце без прослойки. Ниже прослойки количество и размер частиц металлической фазы резко уменьшаются, а ее распределение становится равномерным по высоте и сечению образца.

В обоих образцах в областях, примыкающих к плоскости контакта ильменита и графита, присутствуют только две фазы: металлическая, образованная железом, и оксидная, представленная ильменитом (рис. 2, а). При этом выделение железа происходило как на поверхности, так и внутри зерен ильменита. Состав фаз в точках анализа приведен ниже:

Точка	Содержание элемента, % (ат.)							
	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
1	–	–	–	–	–	1,3	–	98,7
2	69,4	0,8	0,3	–	–	23,0	0,4	6,1
3	–	–	–	–	–	0,8	–	99,2
4	68,6	0,5	0,2	–	–	17,1	0,3	13,2
5	67,9	1,1	3,8	16,4	1,5	0,5	0,3	8,5
6	68,3	0,4	–	–	–	16,6	0,2	14,5
7	66,3	0,4	0,3	–	–	11,5	0,2	21,2
8	63,7	1,4	1,3	16,9	1,2	0,7	0,4	14,5

На небольшом (5 – 10 мм) расстоянии от плоскости контакта концентрата и восстановителя обнаруживаются три фазы: металлическая и две оксидные. Основная оксидная фаза представлена ильменитом, в которой имеются тонкие выделения железосодержащей силикатной фазы. В этом случае частицы восстановленного

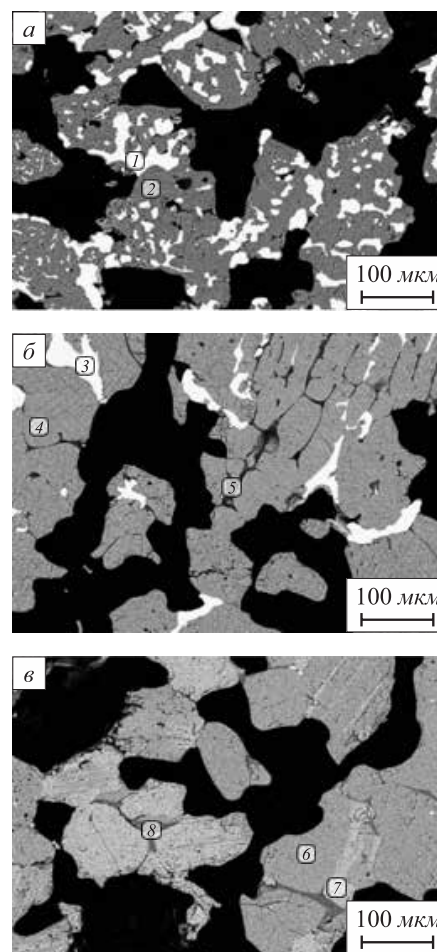


Рис. 2. Металлическая и оксидные фазы после восстановительного обжига концентрата при температуре 1250 °С и выдержке в течение 240 мин:

а – вблизи границы контакта концентрата и восстановителя;

б – на расстоянии 5 – 10 мм от границы;

в – на расстоянии более 10 мм от границы

Fig. 2. Metal and oxide phases after reductive annealing of concentrate at 1250 °C and 240 minutes holding:

а – near the contact border of concentrate and reducing agent;

б – at a distance of 5 – 10 mm from the border;

в – at a distance of more than 10 mm from the border

железа наблюдаются как внутри зерен, так и на их поверхности, примыкая к выделениям силикатной фазы. При этом в областях, где произошло выделение силикатной фазы, происходит спекание частиц концентрата (рис. 2, б).

На значительном (более 10 мм) удалении от границы контакта в обоих образцах обнаруживаются металлическая и три оксидных фазы. Частицы металлической фазы всегда примыкают к силикатной фазе. Оксидные фазы представлены силикатами железа, ильменитовой фазой, имеющей приблизительно стехиометрическое соотношение содержаний титана и железа, и фазой с повышенным содержанием железа, но обедненную оксидами титана (рис. 2, в). В этом случае также происходит спекание оксидных частиц в местах выделения силикатной фазы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате восстановительного обжига при температуре 1250 °С в слое ильменитового концентрата, контактирующем со слоем твердого углерода, происходит селективное восстановление железа. При этом железо восстанавливается не только в частицах, непосредственно контактирующих с углеродом, но и в частицах ильменита, контактирующих только между собой. В результате этого фронт восстановления продвигается в образцах вниз от плоскости контакта твердого углерода с ильменитом ко дну пробирки. Появление на пути распространения восстановительного процесса препятствия в виде прослойки порошка кварца коренным образом меняет характер этого процесса. Продвижение фронта восстановления резко прекращается. Ниже обнаруживаются только отдельные мелкие частицы металла, распределение которых приобретает случайный характер.

Распространение восстановительного процесса в слое ильменита от одной частицы к другой подтверждает развиваемые авторами представления об электронном механизме восстановления. Восстановительный процесс распространяется путем рассеивания в кристаллической решетке оксидов анионных вакансий, содержащих свободные электроны, которые освободились от связи с анионами при взаимодействии оксидов с восстановителем на поверхности оксидного слоя [19 – 22]. Как было показано ранее [21, 22], для перехода анионных вакансий и электронов из одного оксида в другой не требуется даже плотного контакта между ними. Результаты экспериментов настоящей работы подтверждают это положение теории.

Поскольку использованный в экспериментах ильменитовый концентрат является природным комплекс-

ным оксидом, то при высокой температуре в зернах ильменитового концентрата происходит распад раствора с выделением силикатной фазы. Распад оксидного раствора происходит, главным образом, под воздействием нагрева, поэтому выделение железосодержащей силикатной фазы происходит одновременно по всей высоте образцов. Из силикатной фазы железо восстанавливается не только твердым углеродом, но и более слабым восстановителем – газообразным оксидом углерода. В нижней части образцов и при наличии препятствия в виде прослойки из порошка кварцевого стекла, и при его отсутствии возможно восстановление железа по другому механизму – через газовую фазу. Но разные размеры металлических частиц, различие в плотности их распределения по высоте при наличии или отсутствии препятствующей прослойки подтверждают несомненное преобладание восстановительного процесса за счет диффузионного потока заряженных анионных вакансий от плоскости контакта ильменита с твердым углеродом.

Диффузионный характер распространения восстановительного процесса в слое концентрата подтверждается и результатами определения количества выделившегося металла по площади, занимаемой металлической фазой на разных уровнях образца (рис. 3).

Выводы

Распространение восстановительного процесса в слое сыпучего оксидного материала осуществляется преимущественно путем диффузии заряженных анионных вакансий, образующихся на поверхности контакта слоев твердого восстановителя и твердого рудного материала.

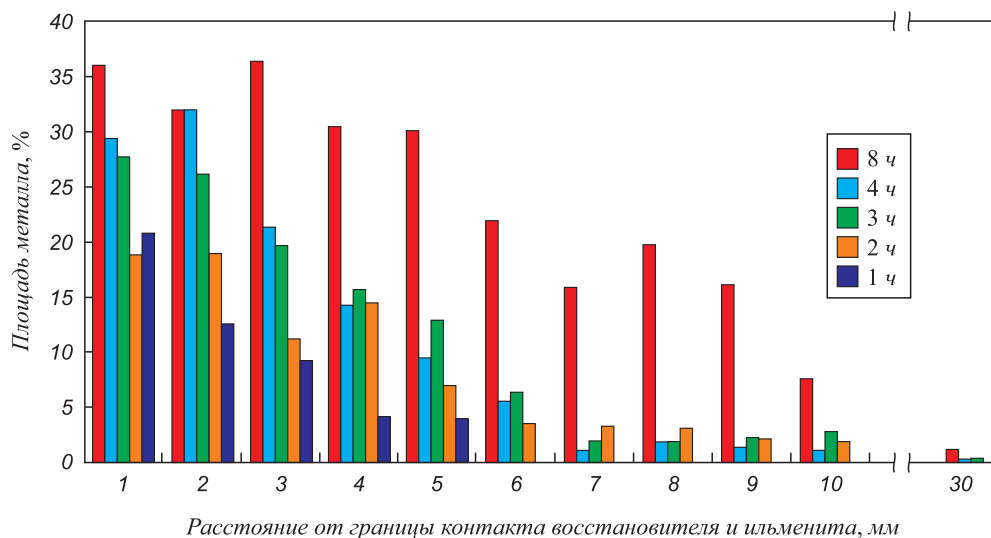


Рис. 3. Выделение металлической фазы в объеме образца в зависимости от удаления от границы контакта концентрата и восстановителя при $T = 1250$ °С

Распад оксидного раствора в ильмените с выделением железосиликатной фазы способствует восстановлению железа не только твердым углеродом, но и газобразным оксидом углерода CO.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Li K.Q., Ni W., Zhu M., Zheng M.J., Li Y. Iron extraction from oolitic iron ore by a deep reduction process // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2011. Vol. 18. No. 8. P. 9 – 13.
- Kapelyushin Y., Xing X., Zhang J., Jeong S., Sasaki Y., Ostrovski O. Effect of alumina on the gaseous reduction of magnetite in CO/CO₂ gas mixtures // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015. Vol. 46. No. 3. P. 1175 – 1185.
- Anacleto N.M., Solheim I., Sorensen B., Ringdalen E., Ostrovski O. Reduction of chromium oxide and ore by methane-containing gas mixtures. – In book: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Cape Town. 2018. – Cape Town. 2018. P. 71 – 78.
- Leikola M., Taskinen P., Eric R.H. Reduction of Kemi chromite with methane // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. Vol. 118. No. 6. P. 575 – 580.
- Jung W.G., Hossain S.T., Johra F.T., Kim J.H., Chang, Y.C. Reduction of chromium ore by recycled silicon cutting sludge waste with carbon addition // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2019. Vol. 26. No. 8. P. 806 – 817.
- Bhalla A., Eric R.H. Mechanism and kinetic modelling of methane-based reduction of Mamatwan manganese ore. – In book: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Cape Town. 2018. – Cape Town, 2018. P. 143 – 156.
- Cheraghi A., Yoozbashizadeh H., Safarian J. Chemical, microstructural, and phase changes of manganese ores in calcination and pre-reduction by natural gas. – In book: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Cape Town. 2018. – Cape Town, 2018. P. 157 – 167.
- Huang R., Lv X.W., Bai C.G., Deng Q.Y., Ma S.W. Solid state and smelting reduction of Panzhihua ilmenite concentrate with coke // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2012. Vol. 51. No. 4. P. 434 – 439.
- Gou H.P., Zhang G.H., Hu X.J., Chou K.C. Kinetic study on carbothermic reduction of ilmenite with activated carbon // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. Vol. 27. No. 8. P. 1856 – 1861.
- Sarkar B.K., Dastidar M.G., Dey R., Das G.C., Chowdhury S., Mahata D.K. Optimization of reduction parameters of quenched titaniferous magnetite ore by boiler grade coal using box-behnken design // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2019. P. 1 – 8.
- Wang S., Chen M., Guo Y., Jiang T., Zhao B. Reduction and smelting of vanadium titanomagnetite metallized pellets // *JOM*. 2018. Vol. 71. No. 3. P. 1144 – 1149.
- Гудима Н.В., Шейн Я.П. Краткий справочник по металлургии цветных металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 536 с.
- Уткин Н.И. Производство цветных металлов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 442 с.
- Fu W., Wen Y., Xie H. Development of intensified technologies of vanadium-bearing titanomagnetite smelting // *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2011. Vol. 18. No. 4. P. 7 – 18.
- Панишев Н.В., Бигеев В.А. Переработка комплексных руд Южного Урала глубокой металлургической // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 2 (19). С. 68 – 70.
- Wang S., Guo Y., Jiang T., Chen F., Zheng F., Yang L., Tang M. Behavior of titanium during the smelting of vanadium titanomagnetite metallized pellets in an electric furnace // *JOM*. 2019. Vol. 71. No. 1. P. 323 – 328.
- Леонтьев Л.И., Ватолин Н.А., Шаврин С.В., Шумаков Н.С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. – М.: Металлургия, 1997. – 432 с.
- Рошин В.Е., Асанов А.В., Рошин А.В. Возможности двухстадийной переработки концентратов титаномагнетитовых руд // *Электрометаллургия*. 2010. № 6. С. 15 – 25.
- Рошин В.Е., Гамов П.А., Рошин А.В., Салихов С.П. Электронная теория восстановления: следствия для теории и практики извлечения металлов из руд // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 5. С. 407 – 417.
- Roshchin V.E., Roshchin A.V. Electron mechanism of reduction processes in blast and ferroalloy furnaces // *CIS Iron and Steel Review*. 2019. Vol. 17. P. 14 – 24.
- Рошин В.Е., Рошин А.В., Гамов П.А., Бильгенов А.С. Электро-массообмен при восстановлении металлов твердым углеродом в твердых комплексных оксидах // *Металлы*. 2020. № 1. С. 59 – 71.
- Рошин В.Е., Рошин А.В. Электронные процессы при восстановлении и извлечении металлов из руд // *Электрометаллургия*. 2020. № 1. С. 14 – 24.

Поступила в редакцию 9 декабря 2019 г.
После доработки 20 января 2020 г.
Принята к публикации 24 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 2, pp. 116–121.

DISTRIBUTION OF SOLID-PHASE REDUCTION OF IRON IN A LAYER OF ILMENITE CONCENTRATE

K.I. Smirnov, P.A. Gamov, V.E. Roshchin

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Processing of titanium-containing ores with extraction of all the major elements is an urgent task of minerals rational use. It is shown that none of the existing processing schemes allows extracting of all the major useful elements at the same time from titanium-containing iron ores, i.e. – iron, titanium and vanadium. This problem can be solved using selective extraction of these elements based on new ideas about electronic reduction mechanism. Propagation of the process of solid-phase selective reduction of iron with the powder of carbon-containing material deep into the layer of grains of ilmenite concentrate from the surface of its contact was experimentally studied. The results of determining the amount of metal phase released as it moves away

from the concentrate – reducing agent contact boundary are presented. Based on the results concerning amount of precipitated metal phase, a conclusion was made about diffusion processes in a layer of concentrate grains contacting only between themselves, limiting process of iron reduction. It is shown that near the plane of contact of solid reducing agent with the layer of concentrate grains, the rate of iron reduction is higher than the rate of high iron content phase precipitation from ilmenite. In depth of ilmenite concentrate layer, process of iron reduction is preceded by formation of iron-containing silicate phase from concentrate grains, where iron is reduced earlier than in ilmenite grains. Formation of iron-containing silicate phase contributes ilmenite grains sintering. It was concluded that in the concentrate layer in contact with solid reducing agent layer in absence of contact of each ilmenite grain with solid reducing agent, the point contact of grains and presence of voids between them in the layer do not prevent

propagation of reduction process in the layer of grains contacting with each other only.

Keywords: ilmenite, titanomagnetite, preliminary reduction, carbothermal reduction, distribution of reduction process, metal phase, complex oxide.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-116-121

REFERENCES

1. Li K.Q., Ni W., Zhu M., Zheng M.J., Li Y. Iron extraction from oolitic iron ore by a deep reduction process. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2011, vol. 18, no. 8, pp. 9–13.
2. Kapelyushin Y., Xing X., Zhang J., Jeong S., Sasaki Y., Ostrovski O. Effect of alumina on the gaseous reduction of magnetite in CO/CO₂ gas mixtures. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015, vol. 46, no. 3, pp. 1175–1185.
3. Anacleto N.M., Solheim I., Sorensen B., Ringdalen E., Ostrovski O. Reduction of chromium oxide and ore by methane-containing gas mixtures. In: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Cape Town, 2018*, Cape Town. 2018, pp. 71–78.
4. Leikola M., Taskinen P., Eric R.H. Reduction of Kemi chromite with methane. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018, vol. 118, no. 6, pp. 575–580.
5. Jung W.G., Hossain S.T., Johra F.T., Kim J.H., Chang, Y.C. Reduction of chromium ore by recycled silicon cutting sludge waste with carbon addition. *Journal of Iron and Steel Research Int.* 2019, vol. 26, no. 8, pp. 806–817.
6. Bhalla A., Eric R.H. Mechanism and kinetic modelling of methane-based reduction of Mamatwan manganese ore. In: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Cape Town, 2018*. Cape Town, 2018, pp. 143–156.
7. Cheraghi A., Yoozbashizadeh H., Safarian J. Chemical, microstructural, and phase changes of manganese ores in calcination and pre-reduction by natural gas. In: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Cape Town, 2018*. Cape Town, 2018, pp. 157–167.
8. Huang R., Lv X.W., Bai C.G., Deng Q.Y., Ma S.W. Solid state and smelting reduction of Panzhihua ilmenite concentrate with coke. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2012, vol. 51, no. 4, pp. 434–439.
9. Gou H.P., Zhang G.H., Hu X.J., Chou K.C. Kinetic study on carbothermic reduction of ilmenite with activated carbon. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017, vol. 27, no. 8, pp. 1856–1861.
10. Sarkar B.K., Dastidar M.G., Dey R., Das G.C., Chowdhury S., Mahata D.K. Optimization of reduction parameters of quenched titaniferous magnetite ore by boiler grade coal using box–behnken design. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2019, pp. 1–8.
11. Wang S., Chen M., Guo Y., Jiang T., Zhao B. Reduction and smelting of vanadium titanomagnetite metallized pellets. *JOM*. 2018, vol. 71, no. 3, pp. 1144–1149.
12. Gudima N.V., Shein Ya.P. *Kratkii spravochnik po metallurgii tsvetnykh metallov* [Outline of non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 536 p. (In Russ.).
13. Utkin N.I. *Proizvodstvo tsvetnykh metallov* [Non-ferrous metals production]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2004, 442 p. (In Russ.).
14. Fu W., Wen Y., Xie H. Development of intensified technologies of vanadium-bearing titanomagnetite smelting. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2011, vol. 18, no. 4, pp. 7–18.
15. Panishev N.V., Bigeev V.A. Processing of complex ores of the Southern Urals by deep metallization. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2016, no. 2 (19), pp. 68–70. (In Russ.).
16. Wang S., Guo Y., Jiang T., Chen F., Zheng F., Yang L., Tang M. Behavior of titanium during the smelting of vanadium titanomagnetite metallized pellets in an electric furnace. *JOM*. 2019, vol. 71, no. 1, pp. 323–328.
17. Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Piro-metallurgicheskaya pererabotka kompleksnykh rud* [Pyrometallurgical processing of complex ores]. Moscow: Metallurgiya, 1997, 432 p. (In Russ.).
18. Roshchin V.E., Asanov A.V., Roshchin A.V. Possibilities of two-stage processing of concentrates of titanomagnetite ores. *Elektrometallurgiya*. 2010, no. 6, pp. 15–25. (In Russ.).
19. Roshchin V.E., Gamov P.A., Roshchin A.V., Salikhov S.P. Electron theory of metals reduction: theory and methods of metals extraction from various types of ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 407–417. (In Russ.).
20. Roshchin V.E., Roshchin A.V. Electron mechanism of reduction processes in blast and ferroalloy furnaces. *CIS Iron and Steel Review*. 2019, vol. 17, pp. 14–24.
21. Roshchin V.E., Roshchin A.V., Gamov P.A., Bil'genov A.S. Electric and mass transfer at metals reduction by solid carbon in solid complex oxides. *Metally*. 2020, no. 1, pp. 59–71. (In Russ.).
22. Roshchin V.E., Roshchin A.V. Electronic processes at reduction and extraction of metals from ores. *Elektrometallurgiya*. 2020, no. 1, pp. 14–24. (In Russ.).

Information about the authors:

K.I. Smirnov, Postgraduate of the Chair “Pyrometallurgical Processes” (smirnovk@susu.ru)
P.A. Gamov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Pyrometallurgical Processes” (gamovpa@susu.ru)
V.E. Roshchin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Chair “Pyrometallurgical Processes” (roshchinve@susu.ru)

Received December 9, 2019

Revised January 20, 2020

Accepted January 24, 2020