

мического средства ПТФЭ с поверхностью наполнителя.

Литература

1. *Наполнители* для полимерных композиционных материалов / Под ред. Г.С. Каца, Д.В. Милевски; Пер. с англ. – М.: Химия, 1981. – 786 с.
2. *Панин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С., Сухарев М.Ф.* Производство теплоизоляционных материалов и изделий: Учебник для подготовки рабочих на производстве. – М.: Высшая школа, 1969. – 304 с.
3. *Панин Ю.А., Андреева М.А., Варламов Б.Г. и др.* Свойства и применение фторопластов, композиций на их основе при низких температурах: Тез. докл. Всесоюзн. конф. – Якутск, 1977. – С. 352.
4. *Демешкин А.Г., Шваб А.А.* Исследование механических свойств непрерывного базальтового волокна применительно к производству композиционных материалов // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2011. – № 3. – С. 185–188.
5. *Пластики* конструкционного назначения / Под ред. Е.Б. Тростянской. – М., 1974. – С. 67–75.

6. *Батаев А.А., Батаев В.А.* Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

7. *Охлопкова А.А., Арзунова А.Г.* Влияние наномодификаторов на деформационно-прочностные свойства фторполимерных композитов // Сб. тр. V Межд. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М., 2013. – С. 518–520.

8. *Okhlopko A.A., Petrova P.N., Fedorov A.L.* Development of Polymer Tribocomposites on the Basis of Polytetrafluoroethylene with an Elevated Wear Resistance // Inorganic Materials: Applied Research. – 2012. – V. 3, № 4. – P. 329–333.

9. *Бирин В.В., Злотников И.И., Сенатрев А.Н., Смуругов В.А.* О некоторых особенностях влияния ультрадисперсных наполнителей на физико-механические и триботехнические свойства ПТФЭ-композитов // Материалы, технологии, инструменты. – Гомель, 2007. – Т. 12, №4. – С. 87–88.

Поступила в редакцию 17.07.2016

УДК 621.762.2: 622.7: 669.094.1

Рентгеноспектральные и морфологические исследования продуктов дробления и прямого восстановления водородом железных руд Ленского рудного поля Республики Саха (Якутия)

П.П. Тарасов***, Б.Ю. Прядезников***, П.П. Петров*, К.В. Степанова*

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

**Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

Приведены результаты рентгеноспектрального элементного и фазового анализа, морфологических исследований продуктов дробления и прямого восстановления водородом железных руд Ленского рудного поля. Выявлено отсутствие селективного обогащения элементами отдельных классов крупности в ходе измельчения в зависимости от крепости и твердости исходных минеральных фаз. Руда содержит пониженное содержание вредных примесей. После восстанавливающего отжига в среде водорода происходит снижение содержания в рудном материале кислорода, значение которого незначительно отличается по классам крупности. В то же время содержание железа повышается с увеличением класса крупности, достигая своего максимума у класса крупности 1–0,5 мм. Морфологическими исследованиями выявлено, что исходные частицы имеют оскольчатую форму, обусловленную способом измельчения. У продуктов восстановления руды наблюдается выраженный рельеф поверхности частиц, образование губчатой поверхности. Индивидуальные частицы имеют неоднородный химический и минеральный состав, сложены из зерен различных фаз, размер которых может

ТАРАСОВ Петр Петрович – к.т.н., доцент, с.н.с., tarasov-p@mail.ru; ПРЯДЕЗНИКОВ Борис Юрьевич – аспирант, вед. инженер, pryadeznikov@mail.ru; ПЕТРОВ Петр Петрович – к.ф.-м.н., в.н.с., prp32@mail.ru; СТЕПАНОВА Ксения Валерьевна – н.с., kseniastepanova@rambler.ru.

составлять от единиц микрон до 80 мкм. Установлена принципиальная пригодность метода прямого восстановления водородом применительно к железным рудам Ленского рудного поля.

Ключевые слова: железная руда, прямое восстановление железа водородом, морфология частиц, фазовый анализ, элементный анализ.

X-ray Spectral and Morphological Studies of the Products of Crushing and Direct Hydrogen Reduction of Iron Ore of the Lena Ore Field of the Republic of Sakha (Yakutia)

P.P. Tarasov***, B.Y. Pryadeznikov***, P.P. Petrov*, K.V. Stepanova*

**Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk*

***Amnosov North-Eastern Federal University, Yakutsk*

The results of X-ray elemental and phase analysis, morphological studies of the products of crushing and direct hydrogen reduction of the Lena ore field iron ore are described. The lack of selective ore dressing of the individual elements of the class size during milling, depending on the strength and hardness of the raw mineral phases is revealed. The ore contains low content of detrimental impurities. After annealing in a reducing atmosphere of hydrogen there is a reduction of oxygen content in the ore material, which value is slightly different in size classes. At the same time, the Fe content increases with the size of the class, reaching its maximum at a class size 1–0,5 mm. The initial particles have the splintered form, due to the grinding process. There is a pronounced relief of the surface of the particles in ore reduction products, the formation of a spongy surface. Individual particles have a heterogeneous chemical and mineral composition, they are composed of grains of different phases with sizes from several microns to 80 microns. Principle suitability of the method of direct reduction with hydrogen in relation to Lensky ore field iron ore is established.

Key words: iron ore direct reduction by hydrogen, particles morphology, phase analysis, elemental analysis.

Введение

Характерной особенностью географического положения современной сырьевой базы горно-рудной, угольной и нефтегазовой промышленности России является то, что центр добычи ископаемых ресурсов находится в районах Сибири и Крайнего Севера. Например, уже в 90-е годы 90 % российского газа добывалось в Западной Сибири. Анализ экономической и геотехнической ситуации свидетельствует, что в течение ближайшего времени в районах Сибири и Крайнего Севера, в том числе в Республике Саха (Якутия), будет сосредоточено до 90% объема добычи нефти, газа и угля, более 70% добычи золота и более 80% добычи другого стратегического сырья. Планируется поэтапное строительство и ввод в эксплуатацию крупных обогащательных и перерабатывающих комплексов. В связи с этим на первый план выходят вопросы надежности, долговечности и безопасности техники при эксплуатации в условиях низких климатических температур (северного исполнения) [1].

До настоящего времени металлические конструкционные материалы продолжают занимать главенствующее положение в изготовлении деталей машин и приборов, инженерных сооружений и изделий. Поэтому повышение качества

производимой металлопродукции является актуальной задачей, особенно в условиях дальнейшего освоения и развития экономики арктических территорий Российской Федерации, а также разработки недр шельфовой зоны Ледовитого океана. Одна из основных причин аварийных разрушений техники и инженерных сооружений, эксплуатируемых в условиях низких естественных температур – применение материалов, конструктивных и технологических решений, не обоснованных с позиции обеспечения прочности, надежности и долговечности оборудования при низких температурах эксплуатации [2,3].

Основным технологическим методом получения чугунов и сталей в настоящее время остается доменный процесс, где восстановление оксидов происходит при взаимодействии с твердым углеродом кокса и газами –восстановителями: оксидом углерода и водородом. Процесс характеризуется большим количеством вредных отходов [4]. В связи с повышением экологических и экономических требований к процессам переработки железных руд с 50-х годов XX столетия в промышленности внедряются бездоменные процессы прямого восстановления железа с использованием природного газа вместо кокса [5]. Продукты прямого восстановления железа в ви-

де металлизированных окатышей используются для получения высококачественных сталей с низким содержанием вредных примесей, повышенными физико-механическими свойствами плавкой в электропечах.

Ведутся непрерывные работы по усовершенствованию методов прямого восстановления смесями газов CO и H₂ [6, 7]. Дальнейшее повышение экологических требований, увеличение потребности в металлах высокой чистоты, истощение запасов коксующегося угля и природного газа, развитие технологии получения чистого водорода обуславливают повышение интереса к процессам прямого восстановления железных руд водородом. При этом, согласно исследованиям германских специалистов, из основных инновационных технологий производства стали на период до 2050 г. наиболее перспективной является технология прямого восстановления железной руды водородом без применения оксида углерода. Данный вывод сделан на основе многокритериального анализа технологий производства стали с применением 12 различных критериев из пяти категорий («Технологии», «Общество и политика», «Экономика», «Безопасность и уязвимость» и «Экология») [8].

Метод прямого восстановления оксидов железа водородом в настоящее время применяется для получения в лабораторных условиях биологически активных наноразмерных порошков железа [9], катализаторов [10], магнитных материалов [11], в экспериментах по обогащению железных руд [12].

Сотрудниками Института физико-технических проблем им. В.П. Ларионова СО РАН и Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова с 2015 г. проводится совместная научно-исследовательская работа по прямому восстановлению водородом железной руды Ленского рудного поля.

Цель работы – определение изменения морфологии, фазового и элементного состава продуктов переработки при прямом восстановлении водородом природно-легированных железных руд Ленского рудного поля Республики Саха (Якутия).

Материалы и методика эксперимента

В работе исследованы образцы из проявления железомарганцевых руд в верховья р. Мундурччу (левый приток р. Амга) Ленского рудного поля Республики Саха (Якутия). Руды сложены окислами железа – гётитом, гидрогётитом и окислами марганца – пиролюзитом, псиломеланом и манганином. Истинная плотность руды определена, согласно ГОСТ 25732-88, и составила 3,05 г/см³. Дробление и измельчение руды производилось с применением гидравлического

пресса ИП-500 и дисковой лабораторной мельницы Fritsch Pulverisette 13. Разделение по крупности механических смесей зерен производилось, согласно ГОСТ 27562-87, сухим методом на ситовом грохоте Fritsch Analusette 3 набором сит с размерами отверстий 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125 и 0,063 мм (модуль сит 2).

Метод прямого восстановления металлов водородом, как технологический процесс, заключается в нагреве подготовленной, т.е. измельченной до определенной крупности, руды в среде газа-восстановителя, в данном случае водорода. Процесс прямого восстановления водородом железа из оксидов протекает по схемам $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ (выше 570°C). Продуктами процесса являются восстановленное железо и вода [13]. Восстановление производилось при температуре 950 °C в течение 40 мин. В восстановленном продукте наблюдается прилипание частиц друг к другу. Для устранения агломерации частиц производилось дополнительное измельчение на вибрационной мельнице в размольной чаше с мелющими шарами из твердого сплава ВК6 в течение 15 мин.

Результаты рентгеноспектрального элементного и фазового анализа

Рентгеноспектральный количественный элементный и фазовый анализ проводился с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра SRS-3400 Broker.

Равномерное распределение элементов по различным классам крупности измельченного рудного материала свидетельствует об отсутствии селективного обогащения отдельных классов крупности элементами в ходе измельчения в зависимости от крепости и твердости исходных минеральных фаз (табл. 1).

Руда содержит четыре основных элемента (в порядке убывания): кислород, железо, кремний и алюминий. Их суммарное содержание в рудном материале составляет 97,1%. Основными примесями являются (содержание более 0,1%) K, Mg, Mn, Ti, Ca, Ba, микрокомпонентами руды – Na, Cl, Cr, Ni, Rb, Sr, Y, Zr, Cs, W, Re, Pt (менее 0,08 %, в табл. 1 не указаны). По содержанию вредных примесей руда соответствует требованиям ГОСТ, предъявляемым к товарным необогащенным железным рудам, содержит пониженное содержание серы, мышьяка, фосфора, цинка, меди и свинца [14].

Результаты фазового анализа также свидетельствуют о равномерном распределении фаз по фракциям измельченного рудного материала (табл.2). Основными фазами являются (в порядке убывания): Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 . Их суммарное содержание в рудном материале составляет

Т а б л и ц а 1

Результаты количественного элементного анализа (до и после восстановления)

Элемент	Содержание по классам крупности, вес. %													
	2–1		1–0,5		0,5–0,25		0,25–0,125		0,125–0,063		<0,063		Среднее	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
O	40	37,4	39,6	36,3	39,5	36,4	39,5	37	39,5	37	39,9	37,5	39,667	36,850
Mg	0,337	0,36	0,348	0,41	0,359	0,39	0,36	0,36	0,365	0,36	0,37	0,33	0,357	0,375
Al	6,444	4,88	6,377	4,04	6,404	4,27	6,355	4,61	6,2	4,61	6,368	4,49	6,358	4,442
Si	16	12	15,31	10,1	15,26	10,2	15,08	11,3	15,24	11,3	16,03	12,4	15,487	11,083
P	0,062	0,07	0,066	0,083	0,065	0,076	0,066	0,075	0,067	0,075	0,065	0,063	0,065	0,076
S	0,017	0,0058	0,018	0,0087	0,015	0,011	0,017	0,026	0,019	0,026	0,022	0,0056	0,018	0,013
K	0,756	0,826	0,772	0,749	0,798	0,592	0,784	0,537	0,763	0,537	0,766	0,609	0,773	0,637
Ca	0,13	0,097	0,128	0,093	0,197	0,114	0,272	0,195	0,326	0,195	0,316	0,125	0,228	0,130
Ti	0,343	0,313	0,329	0,267	0,346	0,286	0,336	0,267	0,334	0,267	0,338	0,302	0,338	0,284
Mn	0,397	0,224	0,444	0,206	0,56	0,455	0,595	0,772	0,684	0,772	0,695	0,374	0,563	0,437
Fe	35,05	43,05	36,12	47,04	35,79	46,39	36,12	44,03	35,92	44,03	34,44	42,81	35,573	44,823
Cu	0,0061	0,0062	0,0061	0,011	0,0056	0,0096	0,0065	0,032	0,0088	0,032	0,0081	0,013	0,007	0,016
Zn	0,042	0,073	0,041	0,055	0,043	0,1	0,0434	0,072	0,0484	0,072	0,0465	0,14	0,044	0,089
Pb	0	0	0	0	0	0	0,0045	0	0	0	0	0	0,001	0

Т а б л и ц а 2

Результаты количественного фазового анализа (до и после восстановления)

Фаза	Содержание по классам крупности, вес. %													
	2–1		1–0,5		0,5–0,25		0,25–0,125		0,125–0,063		<0,063		Среднее	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
MgO	0,56	0,59	0,578	0,67	0,595	0,64	0,597	0,66	0,605	0,6	0,613	0,54	0,591	0,617
Al ₂ O ₃	12,18	9,22	12,05	7,62	12,1	8,07	12,01	8,23	11,72	8,7	12,03	8,49	12,015	8,388
SiO ₂	34,23	25,7	32,76	21,7	32,65	21,9	32,26	22,4	32,6	24,1	34,29	26,6	33,132	23,733
P ₂ O ₅	0,14	0,16	0,15	0,19	0,15	0,17	0,15	0,21	0,15	0,17	0,15	0,14	0,148	0,173
SO ₃	0,042	0,015	0,044	0,022	0,038	0,026	0,043	0,044	0,048	0,066	0,055	0,014	0,045	0,031
K ₂ O	0,911	0,995	0,93	0,902	0,961	0,713	0,944	0,611	0,919	0,647	0,923	0,733	0,931	0,767
CaO	0,182	0,14	0,179	0,13	0,276	0,16	0,381	0,221	0,456	0,273	0,442	0,175	0,319	0,183
TiO ₂	0,572	0,522	0,549	0,446	0,577	0,478	0,56	0,446	0,557	0,446	0,564	0,504	0,563	0,474
MnO	0,512	0,289	0,573	0,266	0,723	0,587	0,768	0,762	0,883	0,997	0,898	0,483	0,726	0,564
Fe ₂ O ₃	50,12	61,55	51,65	67,25	51,18	66,33	51,65	65,22	51,35	62,96	49,24	61,21	50,865	64,087
CuO	0,0076	0,0077	0,0076	0,014	0,0071	0,012	0,0082	0,028	0,011	0,04	0,01	0,016	0,009	0,020
ZnO	0,052	0,09	0,051	0,068	0,054	0,13	0,0541	0,12	0,0603	0,089	0,0579	0,175	0,055	0,112
PbO	0	0	0	0	0	0	0,0048	0	0	0	0	0	0,001	0

97,1%. Фазы с содержанием более 0,08% (в порядке убывания, %): K₂O, MnO, MgO, TiO₂, CaO, P₂O₅, BaO, Na₂O, Cs₂O.

После восстанавливающего отжига в среде водорода происходит снижение содержания в рудном материале кислорода на 3 % (табл. 1), значение которого незначительно отличается по классам крупности. В то же время содержание

железа повышается с увеличением класса крупности, достигая своего максимума у класса крупности 1–0,5 мм. Повышение содержания железа достигается за счет снижения содержания оксидов алюминия и кремния (табл. 2). Более высокое содержание кислорода в частицах рудного материала класса крупности 2–1 мм можно объяснить затруднением диффузии во-

дорода по объему частиц при увеличении их размера. Увеличение степени окисленности рудного материала с уменьшением класса крупности, вероятно, вызвано более активным повторным окислением восстановленного продукта с более высокой удельной поверхностью. Молекулы кислорода, обладающие значительно большими размерами по сравнению с молекулами водорода, в большей степени окисляют поверхность частиц.

Согласно результатам рентгеноспектрального элементного и фазового анализа, представляется возможным сделать вывод об отсутствии необходимости разделения на отдельные классы крупности частиц с размерами менее 1 мм. Это позволит значительно снизить затраты на стадии подготовки рудного материала к восстановлению.

Изучение морфологии частиц рудного материала

Морфологические исследования проведены с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM 3030 для шести классов крупности рудного материала: <0,063 мм; 0,125–0,063 мм; 0,250–0,125 мм; 0,5–0,250 мм; 1–0,5 мм; 2–1 мм.

Основной морфологической характеристикой порошка является форма составляющих ее частиц, практически всецело предопределяемая условиями его формирования [15]. Выявлено, что исходные частицы всех классов крупности

имеют оскольчатую, сложную форму, обусловленную механическим способом измельчения (рис.1–6). Степень полидисперсности частиц после восстановления резко возрастает, особенно для классов крупности 1–0,5 и 2–1 мм, что объясняется доизмельчением восстановленного порошка для устранения агломерации частиц (рис. 5, г; 6, г).

Оценка формы частиц производилась по методу Хаузнера [16]. Частицы относятся к удлиненному неправильному типу. Фактор удлиненности x , характеризующий равноосность частиц, варьируется от 1,36 до 2,15 (табл. 3). Максимального значения она достигает у класса крупности 0,25–0,125 мм, минимального – у класса крупности 1–0,5 мм, что, вероятно, связано с конструктивными особенностями мельницы. Более мелкие классы крупности имеют больший фактор удлиненности, что означает большее содержание продолговатых частиц. С увеличением класса крупности частицы становятся более равноосными.

После восстановления и последующего доизмельчения фактор удлиненности для мелких классов крупности уменьшается, частицы становятся более равноосными. Для классов крупности 1–0,5 и 2–1 мм, наоборот, происходит повышение ее значения. Это вызвано образованием более мелких, неравноосных осколков при доизмельчении.

Фактор объемности частиц y составляет 0,71–0,82, что свидетельствует об отсутствии в очертаниях частиц глубоких выемок и зазубрин.

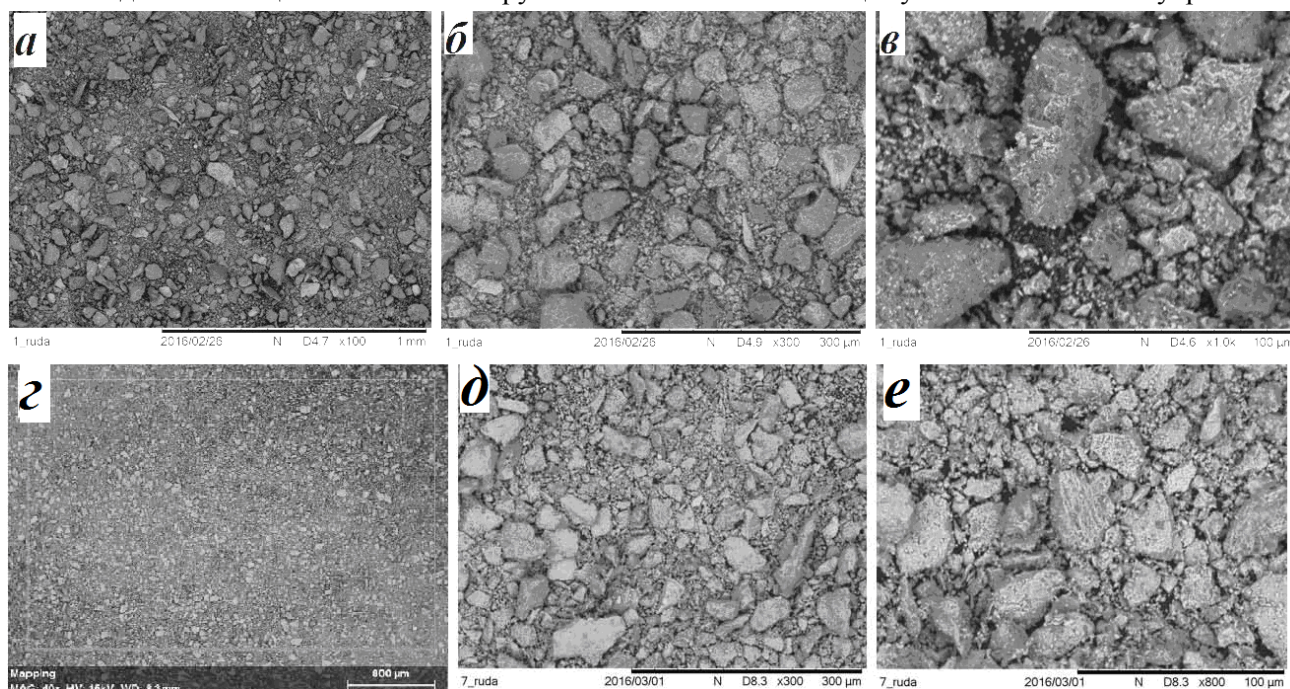


Рис. 1. Морфология частиц рудного материала крупности <0,063 мм: а, б, в – до восстановления; г, д, е – после восстановления. Увеличение: а – 100; б, д – 300; в – 1000; г – 40; е – 800

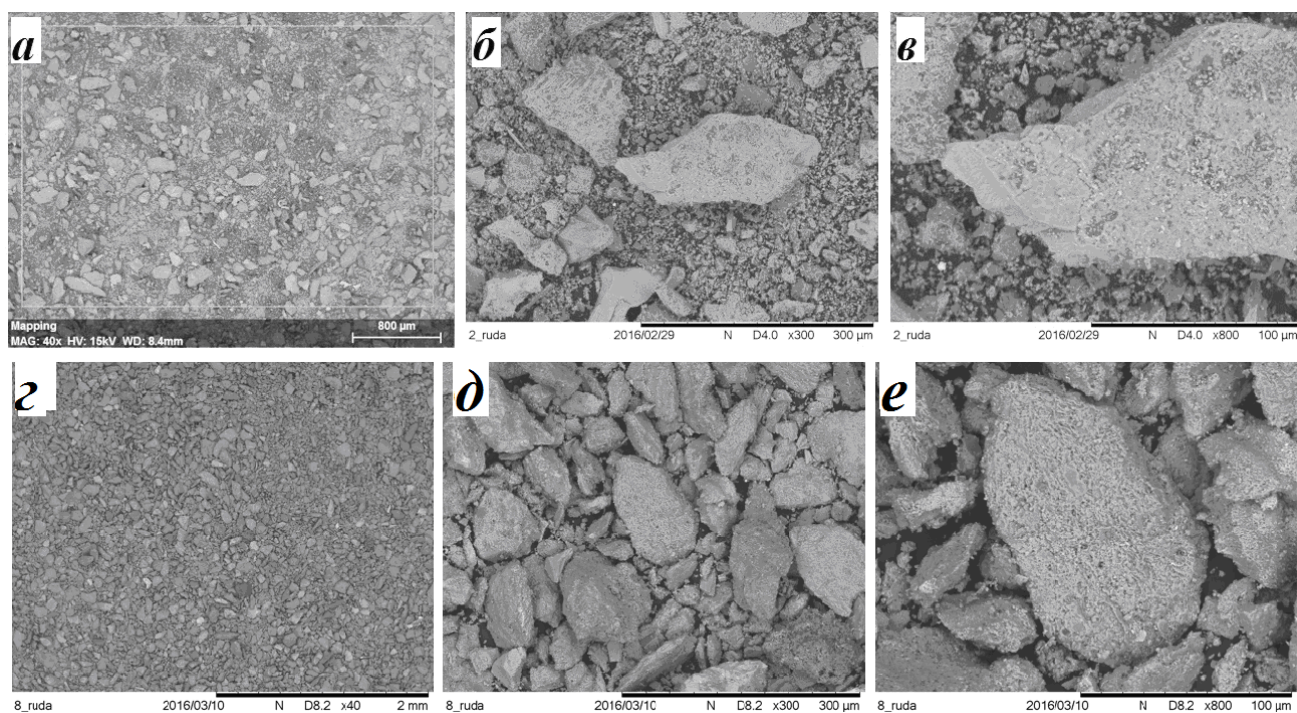


Рис. 2. Морфология частиц рудного материала крупности 0,125–0,063 мм: а, б, в – до восстановления; г, д, е – после восстановления. Увеличение: а, г – 40; б, д – 300; в, е – 800

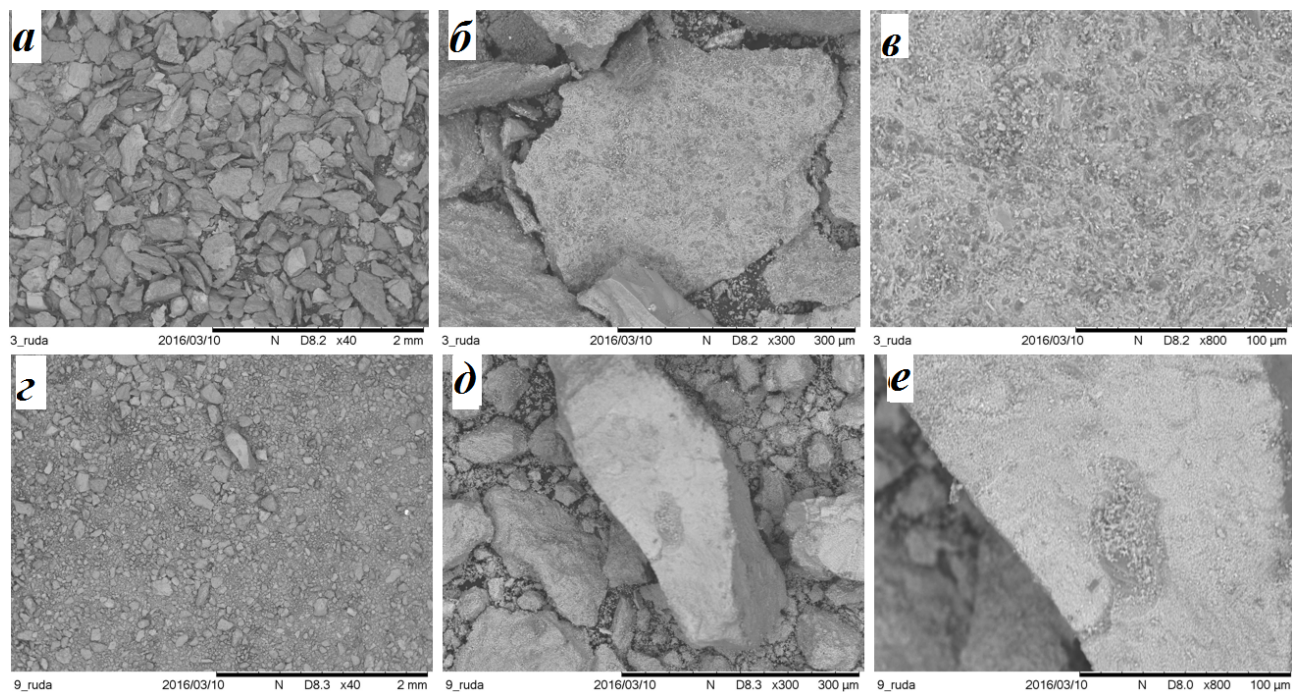


Рис. 3. Морфология частиц рудного материала крупности 0,250–0,125 мм: а, б, в – до восстановления; г, д, е – после восстановления. Увеличение: а, г – 40; б, д – 300; в, е – 800

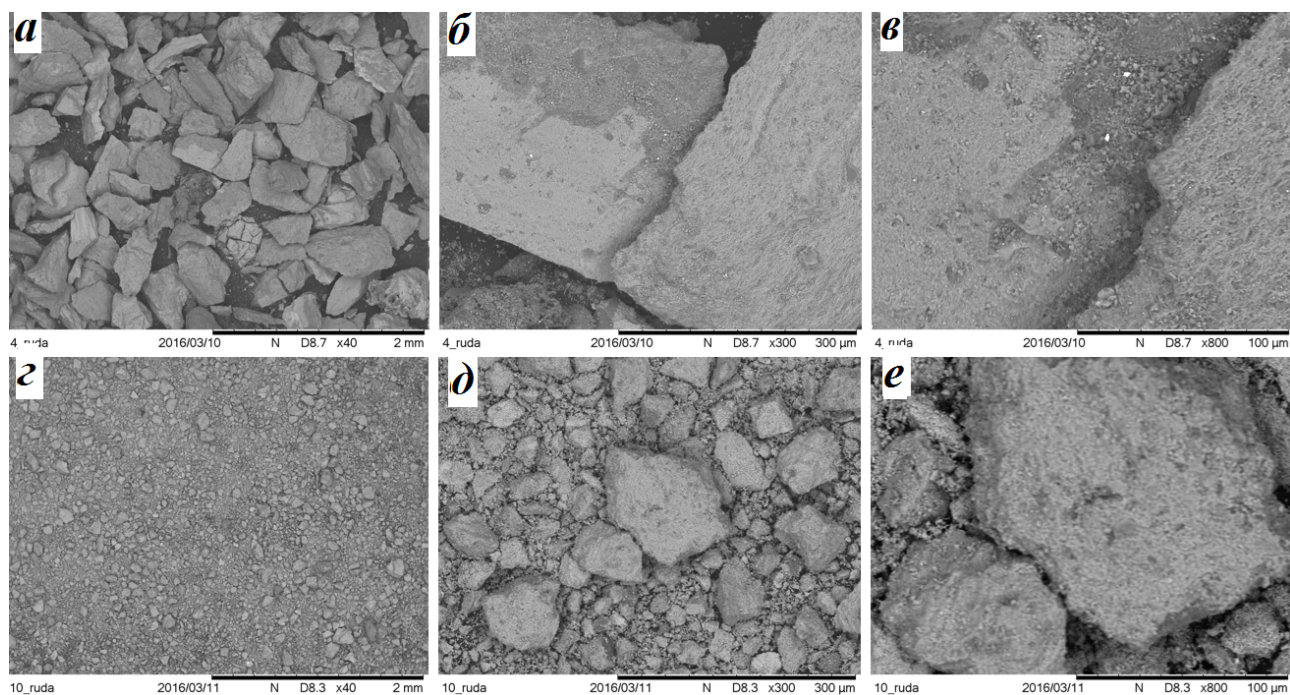


Рис. 4. Морфология частиц рудного материала крупности 0,5–0,250 мм: а, б, в – до восстановления; г, д, е – после восстановления. Увеличение: а, г – 40; б, д – 300; в, е – 800

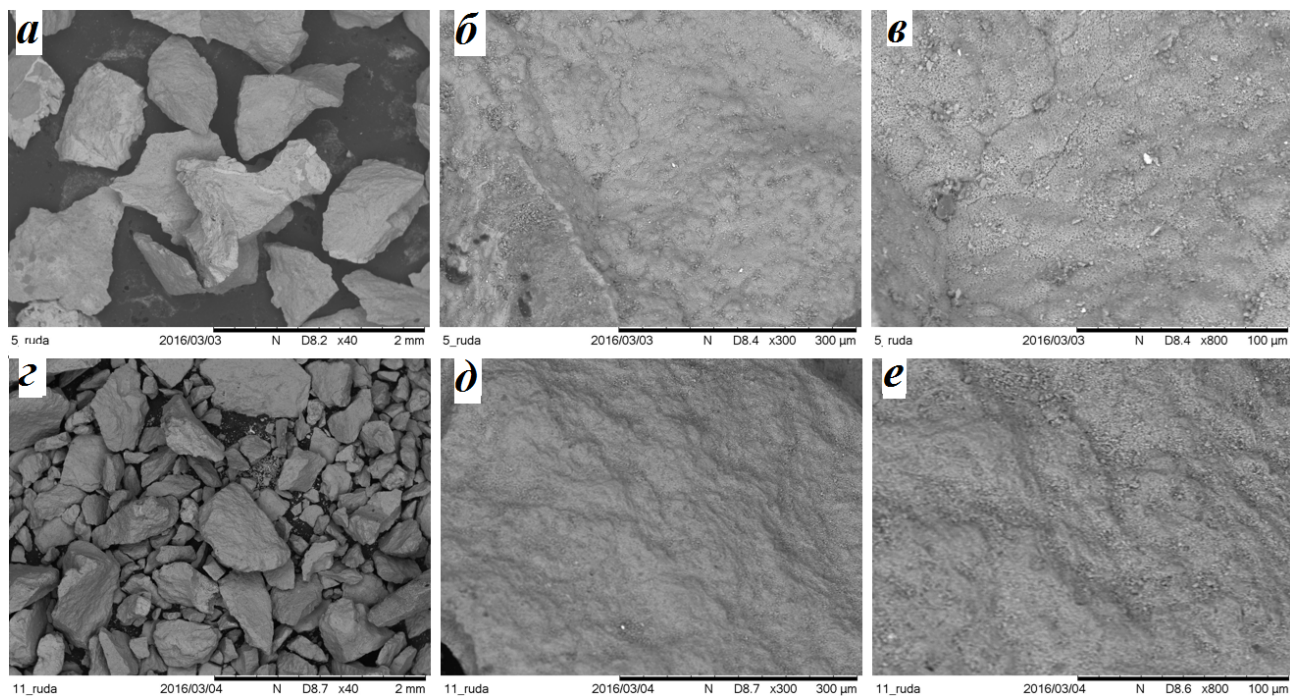


Рис. 5. Морфология частиц рудного материала крупности 1–0,5 мм: а, б, в – до восстановления; г, д, е – после восстановления. Увеличение: а, г – 40; б, д – 300; в, е – 800

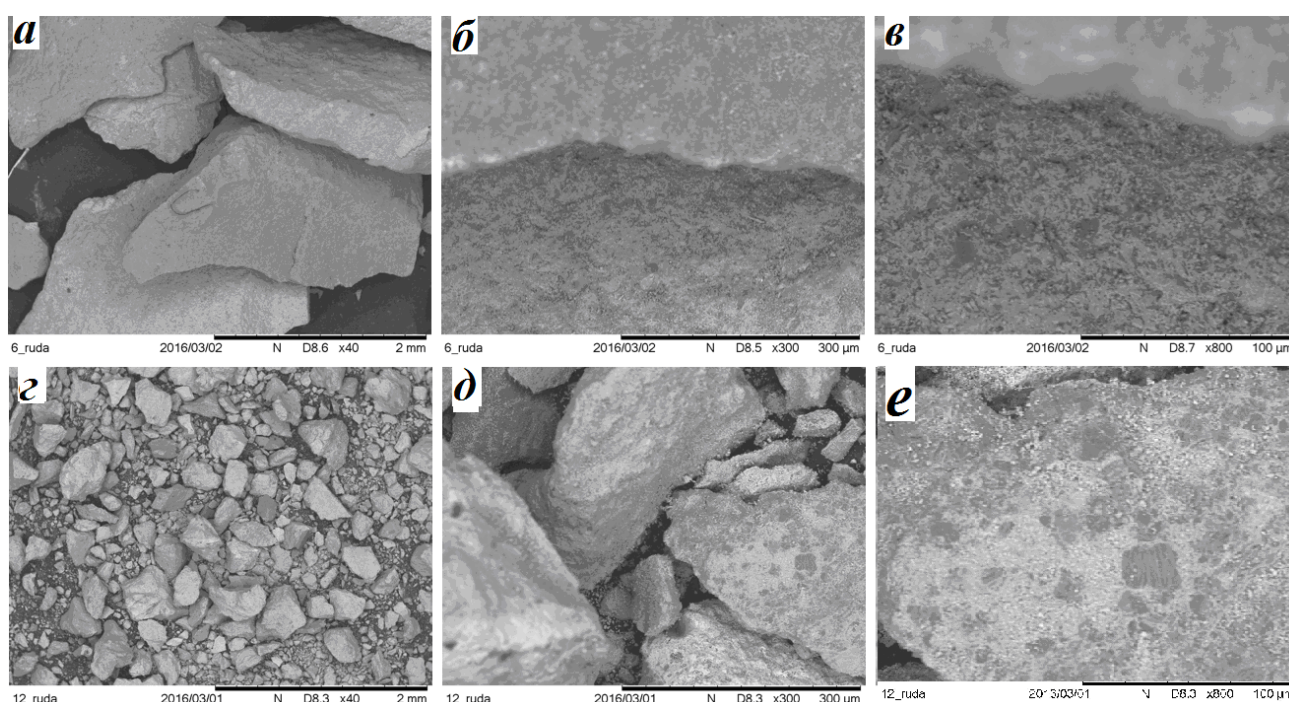


Рис. 6. Морфология частиц рудного материала крупности 2–1 мм: а, б, в – до восстановления; г, д, е – после восстановления. Увеличение: а, г – 40; б, д – 300; в, е – 800.

Т а б л и ц а 3

Фактор удлинённости по классам крупности

Состояние	Фактор удлинённости по классам крупности						
	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,125	0,125–0,063	<0,063	Среднее
До восстановления	1,40	1,36	1,63	1,97	1,93	1,88	1,70
После восстановления	1,81	1,44	1,48	2,15	1,45	1,53	1,64
Среднее	1,61	1,40	1,56	2,06	1,69	1,71	1,67

Поверхность частиц до восстановления сглаженная (рис. 2, в; 3, б; 4, б; 5, б; 6, б). У продуктов восстановления руды наблюдается более выраженный рельеф поверхности частиц, образование губчатой поверхности (рис. 2, е; 4, е; 5, е). Имеющиеся топографические различия между частицами сходной морфологии приводят к различию значений площади поверхности, ее химической активности, склонности к удержанию загрязнений, возможных трудностях при обогащении, классификации и дальнейшем использовании рудного материала. Индивидуальные частицы имеют неоднородный химический и минеральный состав, сложены из зерен различных фаз, размер которых может составлять: единицы микрон (рис. 2, в; 5, е), до 30 мкм (рис. 6, е), до 80 мкм (рис. 3, е). Неоднородность состава, наличие включений оксидов других элементов затрудняют процесс восстановления и обогащения рудного сырья.

Закключение

Выявлена принципиальная пригодность метода прямого восстановления водородом применительно к железным рудам Ленского рудного поля. Примененная в работе схема дробления и измельчения руды в дисковой мельнице с последующим разделением на классы крупности на ситовом грохоте не приводит к селективному обогащению элементами отдельных классов крупности в зависимости от крепости и твердости исходных минеральных фаз, что установлено рентгеноспектральным анализом. Руда содержит пониженное содержание вредных примесей. Содержание кислорода по классам крупности меняется незначительно, концентрация железа достигает максимума у класса крупности 1–0,5 мм, что позволяет сделать вывод об отсутствии необходимости деления на отдельные классы крупности частиц с размерами менее 1 мм.

Морфологическими исследованиями выявлено, что у продуктов восстановления руды наблюдается выраженный рельеф поверхности частиц, образование губчатой поверхности. Индивидуальные частицы имеют неоднородный химический и минеральный состав, сложены из зерен различных фаз, размер которых может составлять от единиц микрон до 80 мкм.

Представляется перспективным применение метода прямого восстановления водородом руды для получения концентрата с последующим применением его в качестве сырья для получения высококачественных сталей и сплавов.

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру ИФТПС СО РАН Ачикасовой В.С. и ведущему инженеру ИГДС СО РАН Гороховой Л.Н. за помощь при выполнении экспериментальной части данного исследования.

Литература

1. Лебедев М.П., Петров П.П., Большаков А.М. Надежность материалов и конструкций для холодного климата – основа безопасности и развития промышленного потенциала Севера России // Сб. тр. Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата: Пленарные доклады. (1–3 декабря 2014 г.). – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 11–17.
2. Солнцев Ю.П., Титова Т.И. Стали для Севера и Сибири. – СПб.: Химиздат, 2002. – 352 с.
3. Шульгинов Б.С. О некоторых причинах снижения долговечности элементов машин и конструкций в условиях Крайнего Севера // Проблемы прочности. – 1988. – № 12. – С. 25–29.
4. Тарасов А.В., Уткин Н.И. Общая металлургия. – М.: Металлургия, 1997. – 590 с.
5. Muscolino F., Martinis A., Ghiglione M., Duarte P. Introduction to direct reduction technology and outlook for its use // Metallurgia Italiana. – 2016. – V. 4. – P. 25–31.
6. Skorians M., Mali H., Pichler A. at etc. Reduction Behavior and Structural Evolution of Iron Ores in Fluidized Bed Technologies. Part 1: Method for the Determination // Steel research international. – 2016. – V. 87, № 5. – P. 633–641.
7. Di Cecca C., Barella S., Mapelli C., Ciuffini A.F., Gruttadauria A., Mombelli D., Bondi E. Use of DRI/HBI in ironmaking and steelmaking furnaces // Metallurgia Italiana. – 2016. – V. 4. – P. 33–38.
8. Weigel M., Fischedick M., Marzinkowski J., Winzer P. Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies // Journal of cleaner production. – 2016. – V. 112, № 1. – P. 1064–1076.
9. Балдохин Ю.В., Корнеев В.П., Коваленко Л.В., Суздаев И.П., Колотыркин П.Я., Арсентьева И.П., Фолманис Г.Э. Низкотемпературное водородное восстановление гидроксида железа. Образование нанокластеров и наноструктур // Перспективные материалы. – 2009. – №6. – С. 72–76.
10. Шинкарев А.А. (мл.), Старишинова В.Л., Гневашев С.Г., Абдуллин И.Ш. Прямое восстановление железа из оксигидроксида в высокочастотном водородном емкостном разряде пониженного давления // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т.18, №13. – С. 122–125.
11. Ozgur Karaagac. Characterizations of Iron Particles Reduced from Iron Oxide Nanoparticles Under Hydrogen Atmosphere // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2013. – V. 26. – P. 1707–1711.
12. Lei Guo, Han Gao, Jin-tao Yu, Zong-liang Zhang, Zhan-cheng Guo. Influence of hydrogen concentration on Fe₂O₃ particle reduction in fluidized beds under constant drag force // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2015. – V. 22. – P. 12–20.
13. Байков А.А. Избранные труды. – М.: Металлургиздат, 1961. – 328 с.
14. ГОСТ Р 52939-2008. Руды железные товарные необогащенные. Общие технические условия.
15. Буланов В.Я., Кватер Л.И., Долгаль Т.В., Угольников Т.А., Акименко В.Б. Диагностика металлических порошков. – М.: Наука, 1983. – 273 с.
16. Hausner H.H. Characterization of the powder particle shape // In: Proc. of Conf. Particle size analysis, 14–16 Sept., 1966. – L., 1966. – P. 20–28.

Поступила в редакцию 21.06.2016