



УДК 669.094.1

DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-644-652



Оригинальная статья

Original article

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОДОРОДОМ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

Ю. В. Конюхов¹, Р. Ханна², Н. А. Масленников¹,
К. Ли³, Ц. Лян³, И. Н. Бурмистров¹, Д. Ю. Карпенков⁴,
С. В. Кашевский¹, М. В. Кравченко⁵

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1)

² Университет Нового Южного Уэльса, Институт материаловедения и инженерии (Австралия, 2052, Новый Южный Уэльс, Сидней)

³ Пекинский университет науки и технологий, Институт металлургической и экологической инженерии (Китай, 100083, Пекин)

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1)

⁵ Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1)

✉ martensit@mail.ru

Аннотация. В работе исследовали превращения немагнитных или слабомагнитных компонентов железных руд в магнитную фазу «магнетит» в результате частичного восстановления водородом при температурах ниже 400 °С. Исследованные четыре вида промышленных железных руд российских и китайских месторождений существенно различаются по составу и морфологии. Для подготовки образцов руды измельчали с помощью механического истирания в ступке и просеивали через сита с размером ячеек 1,5 мм. Восстановление проходило в изотермических условиях в трубчатой печи при температурах 375 и 400 °С в течение одного часа. Для изучения кинетики процесса восстановления были проведены неизотермические исследования выбранных руд с использованием термогравиметрического анализатора при нагреве до 800 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин в токе водорода. Детальная характеристика исходных и частично восстановленных руд осуществлялась с использованием рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии для определения магнитных характеристик. На рентгеновских дифрактограммах исходных образцов присутствуют пики гематита, а в восстановленных как при 400 °С, так и при 375 °С – пики магнетита и металлического железа. Аналогичное поведение наблюдалось для всех четырех рудных образцов. Наиболее важным результатом исследования является подтверждение увеличения намагниченности насыщения на порядок для гематитовых руд, при этом восстановленные образцы руды показали магнитомягкие свойства со средними значениями коэрцитивной силы примерно 20 кА/м. Таким образом показано, что применение метода низкотемпературного восстановления водородом на железных рудах с низким содержанием магнитных фаз является весьма перспективным для получения материалов, которые в дальнейшем могут быть подвергнуты обогащению методами магнитной сепарации.

Ключевые слова: железные руды, водородное восстановление, гематит, магнетит, кинетика металлизации, «зеленая» металлургия, обогащение полезных ископаемых, магнитные свойства

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00672).

Для цитирования: Конюхов Ю.В., Ханна Р., Масленников Н.А., Ли К., Лян Ц., Бурмистров И.Н., Карпенков Д.Ю., Кашевский С.В., Кравченко М.В. Применение метода низкотемпературного восстановления водородом для улучшения магнитных характеристик железных руд. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(6):644–652. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-644-652>

APPLICATION OF LOW-TEMPERATURE REDUCTION BY HYDROGEN FOR ENHANCING THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF SEVERAL IRON ORES

Yu. V. Konyukhov¹ , R. Khanna², N. A. Maslennikov¹, K. Li³,
Z. Liang³, I. N. Burmistrov¹, D. Yu. Karpenkov⁴,
S. V. Kashevskii¹, M. V. Kravchenko⁵

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (4/1 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

² University of New South Wales, Institute of Materials Science and Engineering (Sydney, NSW 2052, Australia)

³ School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing (Beijing 100083, China)

⁴ M.V. Lomonosov Moscow State University (1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation)

⁵ National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow 119049, Russian Federation)

 martensit@mail.ru

Abstract. The conversion of non-magnetic or weakly magnetic constituents of iron ores into the magnetic ‘magnetite’ phase was investigated using partial reduction by hydrogen at temperatures below 400 °C. The examined four commercial iron ores from Russian and Chinese deposits have significant differences in their compositions and morphologies. All ore samples were crushed using mechanical abrasion in a stamp and sieved with a mesh size of 1.5 mm. Reduction was carried out in a tube furnace under isothermal conditions at 375 and 400 °C for one hour. To study the kinetics of the reduction process, non-isothermal studies of selected ores were conducted using a thermogravimetric analyzer with heating to 800 °C at a heating rate of 10 °C/min in hydrogen flow. The authors made a detailed characterization of the annealed products using X-ray diffraction, scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy to determine the magnetic characteristics of initial and partially reduced ores. X-ray diffraction patterns showed hematite peaks in the initial samples; both magnetite and metallic iron peaks were detected in the samples reduced at 375 and 400 °C. Such behavior was observed for all four samples under investigation. The most important result of the study is the confirmation of an order of magnitude increase in saturation magnetization for hematite ores, in addition the reduced ore samples show soft magnetic properties with average coercive force values of approximately 20 kA/m. Application of the low-temperature reduction by hydrogen to iron-containing ores is very promising for production of the materials that could later be subjected to enrichment using magnetic separation methods.

Keywords: iron ores, reduction by hydrogen, hematite, magnetite, metallization kinetics, “green” metallurgy, mineral processing, magnetic properties

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-29-00672).

For citation: Konyukhov Yu.V., Khanna R., Maslennikov N.A., Li K., Liang Z., Burmistrov I.N., Karpenkov D.Y., Kashevskii S.V., Kravchenko M.V. Application of low-temperature reduction by hydrogen for enhancing the magnetic characteristics of several iron ores. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):644–652. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-644-652>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время человечество сильно обеспокоено проблемой глобального потепления, которое, главным образом, связывают с выбросами углекислого газа [1; 2]. Примерно 7 % всего образующегося в мире углекислого газа приходится на металлургическую промышленность [3]. В среднем на тонну черновой стали выбрасывается 1,9 т углекислого газа [4]. Как следует из отчета Всемирной ассоциации стали (World Steel Association), объем выпуска стали в Российской Федерации в 2022 г. составил 71,5 млн т. В то же время Китай производит более 1 млрд. т черновой стали в год [5].

Металлургическая промышленность под влиянием экологов и общества в скором времени будет вынуждена сократить выбросы углекислого газа, что потребует перевода процесса производства металла на более экологически чистые и энергоэффективные технологии. В рассматриваемом направлении наиболее перспективной считается технология прямого восстановления железа водородом [6; 7], так как в результате реакции выделяются пары H_2O , а не углеродсодержащие газобразные продукты (CO/CO_2).

Широкое применение технологии прямого водородного восстановления в настоящее время сдерживается высокой стоимостью водорода H_2 , которая определяется освоенными методами его получения [8]. Известны следующие основные методы синтеза водорода: паровая конверсия метана и природного газа, газификация угля, электролиз воды, пиролиз, частичное окисление, биотехнологии и атомно-водородный [9]. По данным работы [10], годовой объем потребления водорода в мире в 2020 г. составлял 115 млн т. По прогнозам объем потребления и, соответственно, производства должен достичь к 2030 г. 530 млн т.

Для получения одной тонны стали требуется порядка 51 кг водорода [11]. Расчеты показывают, что для перевода гематита в магнетит необходимо затратить всего 4,31 кг водорода на тонну Fe_3O_4 . В связи с этим на начальном переходе к водородной металлургии представляется целесообразным проводить не полное восстановление железорудных материалов до железа, а частичное на этапе процесса обогащения.

В ряде железных руд железо представлено полностью или частично гематитом, извлечение которого затруднено. В этом случае восстановление водородом позволит

перевести гематит в магнетит с дальнейшим его выделением магнитной сепарацией [12; 13]. Суперконцентраты на основе магнетита с долей железа более 72 % [14; 15] могут подаваться (вдуваться) в нижнюю часть доменной печи [16; 17], что должно способствовать снижению выбросов CO_2 за счет изменения массового и теплового балансов доменной печи и отсутствия стадии агломерации. Кроме этого, суперконцентраты имеют перспективы стать основным сырьем для использования в процессах прямого получения железа в шахтных и подовых печах [18]. Следует ожидать, что применение частично восстановленных оксидов в качестве исходных материалов приведет к уменьшению времени достижения полного восстановления железа [19] и, следовательно, повысится энергоэффективность производства.

Большая часть работ, посвященных исследованию кинетики восстановления железорудных материалов водородом, сфокусирована на процессах, которые протекают в области температур от 500 до 1000 °C и завершаются получением металла [4; 20]. В этих исследованиях образование магнетита рассматривается как промежуточная реакция в общем процессе восстановления руды до чистого железа. В области процессов низкотемпературного (до 400 °C) восстановления железорудных материалов водородом исследования практически не ведутся. В связи с этим целью настоящей работы являлось определение возможности перевода немагнитных или слабомагнитных составляющих железных руд в магнетит путем частичного восстановления в токе водорода при температурах ниже 400 °C.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследований были выбраны гематитовая руда (аглоруда) Михайловского ГОКа им. Варичева (руда *A*), железная руда Печегубского месторождения Оленегорского ГОКа (руда *B*) и руды, предоставленные партнерами из КНР (руда *C* и *D*).

Отделение пустой породы российских руд проводили с помощью лабораторных сит. Далее все руды подвергались механическому истиранию в лабораторной ступке и просеивались через сито с размером ячейки 1,5 мм.

Восстановление в изотермических условиях проводили в трубчатой печи Carbolite Gero KST/KZS (Великобритания) при температурах 375 и 400 °C. Для опытов использовали керамические лодочки размером 100×20×15 мм. Высота слоя порошка составляла 2–3 мм. Образцы нагревали в токе гелия. После достижения заданной температуры перекрывали поток гелия и подавали водород, производимый генераторами водорода САМ-1 и ЦветХром (Россия) с общей производительностью 80 л/час. Водород предварительно проходил через систему осушки на основе силикагеля. После выдержки образцы остужали в токе гелия.

Исследования восстановления в режиме линейного нагрева со скоростью 10 °C/мин в токе водорода проводили на термогравиметрическом анализаторе «SDT Q600» (США).

Определение фазового состава образцов проводили при помощи рентгеновского настольного дифрактометра TDM-20 (Китай) с медным анодом. Расшифровку дифрактограмм проводили с использованием программного обеспечения Match!3 (Cristal Impact, Германия).

Исследования состава газовой атмосферы, образующейся при окислительном отжиге при температуре 800 °C, проводили в печи проточного хемосорбционного анализатора ChemBet pulsar (США), там же задавали скорость потока воздуха. В печи в токе атмосферного воздуха при скорости нагрева 50 °C/мин нагревали U-образный кварцевый реактор до 500 °C. Далее газоздушная смесь нагревалась до 800 °C при скорости 30 °C/мин и из реактора поступала в квадрупольный масс-спектрометр Pfeiffer Vacuum OmniStar GSD 320 (Германия). Диапазон измерения масс прибора от 1 до 300 атомных единиц массы (а.е.м.). Поскольку в диапазонах от 1 до 10 и от 45 до 300 а.е.м. характерных сигналов не наблюдается, для измерения был выбран диапазон от 10 до 45 а.е.м.

Микрофотографии были получены с помощью сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN VEGA3 SB (Чехия). Элементный анализ проводился методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на приставке INCA Energy 450 (Великобритания). Диаметр зонда при определении элементного состава составлял 300 нм, погрешность определения – ±1 %.

Измерение магнитных свойств проводили с помощью вибрационного магнитометра VSM-130, DEXING Magnet Company (Китай), погрешность определения магнитного момента $1 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены микрофотографии исходных материалов. Частицы руд (российского происхождения) имеют преимущественно округлую форму (рис. 1, *a, б*), что характерно для природных материалов, не подвергавшихся интенсивному измельчению. Распределение частиц в руде *A* довольно узкое и размер варьируется от 10 до 160 мкм, в руде *B* большая часть частиц имеет размеры в диапазоне 50–800 мкм, при этом встречаются частицы диаметром 1 мм и более. В руде *C* (китайского происхождения) присутствуют частицы пластинчатой и осколочной форм (рис. 1, *в*). Частицы осколочной формы мелкие и их размер варьируется в пределах от 3 до 35 мкм. Пластинчатые частицы существенно крупнее, их размеры составляют 10–100 мкм, а толщина 1–3 мкм. Наблюдаемая микроструктура дает основания предполагать, что руда *C* представляет собой смесь из двух или более железорудных мате-

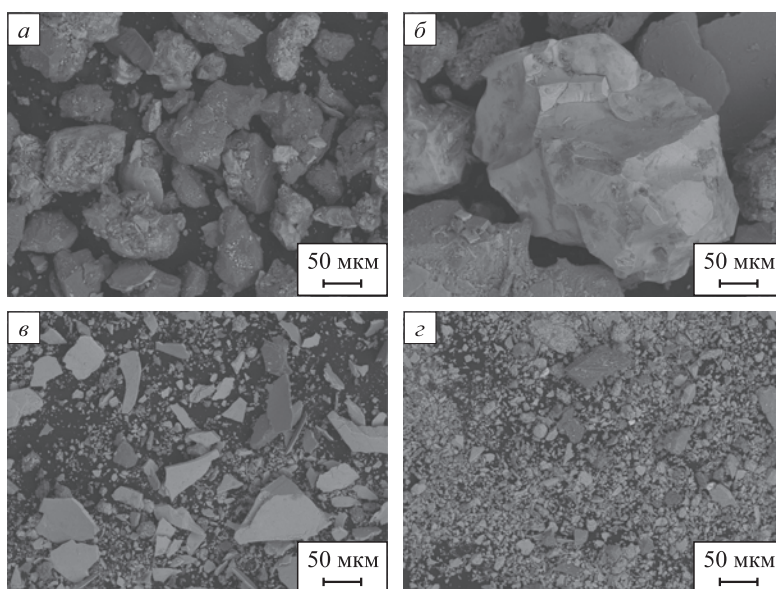


Рис. 1. Микрофотографии: руда *A* (*a*), *B* (*б*), *C* (*в*) и *D* (*г*)

Fig. 1. SEM photos: ore *A* (*a*), *B* (*б*), *C* (*в*) and *D* (*г*)

риалов. Руда *D* (китайского происхождения) имеет в своем составе частицы осколочной и сферической форм (рис. 1, *г*) субмикронного размера: от 3 до 35 мкм. Известно, что магнетитовые руды, как правило, отличаются трудной измельчаемостью, а процесс измельчения является одной из самых затратных операций при обогащении полезных ископаемых. Субмикронный размер частиц может свидетельствовать о том, что железорудный материал подвергался предварительной обработке реагентами для извлечения более ценных элементов.

В табл. 1 представлены результаты определения методом энергодисперсионной спектроскопии (EDX) элементного состава исходных и обработанных в течение 1 ч водородом при температуре 375 °С руд. Следует отметить схожесть исследуемых материалов по составу. Российские рудные материалы характеризуются высоким содержанием кремния (более 20 мас. %), так как они не обогащались. Натрий в количестве 0,7 – 0,8 % присутствует только в руде *B*. Сера в количестве 0,2 – 0,6 мас. % присутствует во всех образцах, кроме

Таблица 1. Элементный состав железорудных материалов в исходном состоянии и после обработки в токе водорода при температуре 375 °С в течение 1 ч

Table 1. Elemental composition of iron ore materials in the initial state and after processing in hydrogen flow at a temperature of 375 °C for 1 h

Состояние материала	Содержание элемента, мас. %											
	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Mn	Ti	Ba
Руда <i>A</i>												
До обработки	41,74	–*	0,45	2,91	20,10	0,61	0,46	0,53	33,21	–	–	–
После обработки	26,76	–	0,51	2,55	21,10	1,37	0,52	1,16	46,03	–	–	–
Руда <i>B</i>												
До обработки	46,73	0,81	2,38	3,42	21,88	0,18	1,05	1,92	21,48	–	0,15	–
После обработки	41,37	0,71	2,33	3,14	27,40	0,43	1,02	2,35	21,34	–	–	–
Руда <i>C</i>												
До обработки	33,10	–	1,02	1,23	1,43	–	0,26	5,28	57,67	–	–	–
После обработки	23,16	–	1,35	1,73	2,70	–	0,37	6,36	64,32	–	–	–
Руда <i>D</i>												
До обработки	33,69	–	–	1,55	3,20	0,35	0,40	2,81	56,76	0,85	–	0,39
После обработки	29,23	–	0,65	1,85	4,39	0,52	0,52	4,52	57,14	1,18	–	–

* – ниже предела обнаружения методом EDX для соответствующего элемента.

руды С. В этом образце серы не обнаружено. Отсутствие серы может быть связано с повышенным содержанием кальция, который мог быть добавлен специально, либо уже находился в природном сырье в виде карбонатов или других соединений.

С целью проверки наличия углерода в исследуемых железорудных материалах были исследованы составы газа, образующегося при прокаливании рудных материалов на воздухе. Спектры подтверждают, что при температуре 800 °С имеет место выделение CO_2 при а.е.м. = 44 вследствие разложения карбонатов. На рис. 2 для примера представлен масс-спектр газовой фазы, которая образовывалась в результате прокаливания образца из руды С на воздухе при температуре 800 °С. Общая потеря массы при окислительном отжиге руд А и В составила 3,52 и 3,16 % соответственно. Убыль массы при прокаливании китайских железорудных материалов составила 19,59 % (руда С) и 12,45 % (руда D). Более высокие значения общей убыли массы у китайских рудных материалов объясняются более высоким содержанием карбонатов, а также меньшим содержанием диоксида кремния.

Взаимодействие железорудных материалов с водородом в неизотермических условиях протекает с заметными отличиями в режимах изменения массы. Сравнительный анализ термогравиметрических кривых (рис. 3) позволяет выделить общие закономерности и отличительные особенности протекания процесса металлизации железорудных материалов различной природы в токе водорода. Под металлизацией понимают процессы частичного или полного разложения оксидных форм и восстановление до металлов или низших оксидов.

Первые два пика на термограмме руды А (рис. 3, а, кривая ДТГ) соответствуют удалению адсорбированной влаги. Пик в районе 300 °С, вероятно, относится к раз-

ложению гидроксидов, которые могли образоваться при контакте руды с влагой. В интервале 350 – 450 °С происходит восстановление гематита до магнетита. На следующих этапах протекает восстановление магнетита до железа (при температурах менее 570 °С), минуя образование вюстита. В связи с тем, что процесс потери массы

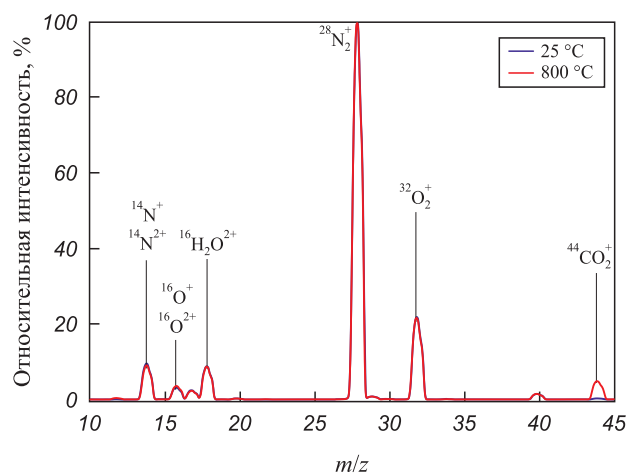


Рис. 2. Масс-спектры газовой фазы, образующейся при продувке воздухом руды А при температурах 25 и 800 °С

Fig. 2. Mass spectra of the gas phase formed during air blowing of ore A at 25 and 800 °С

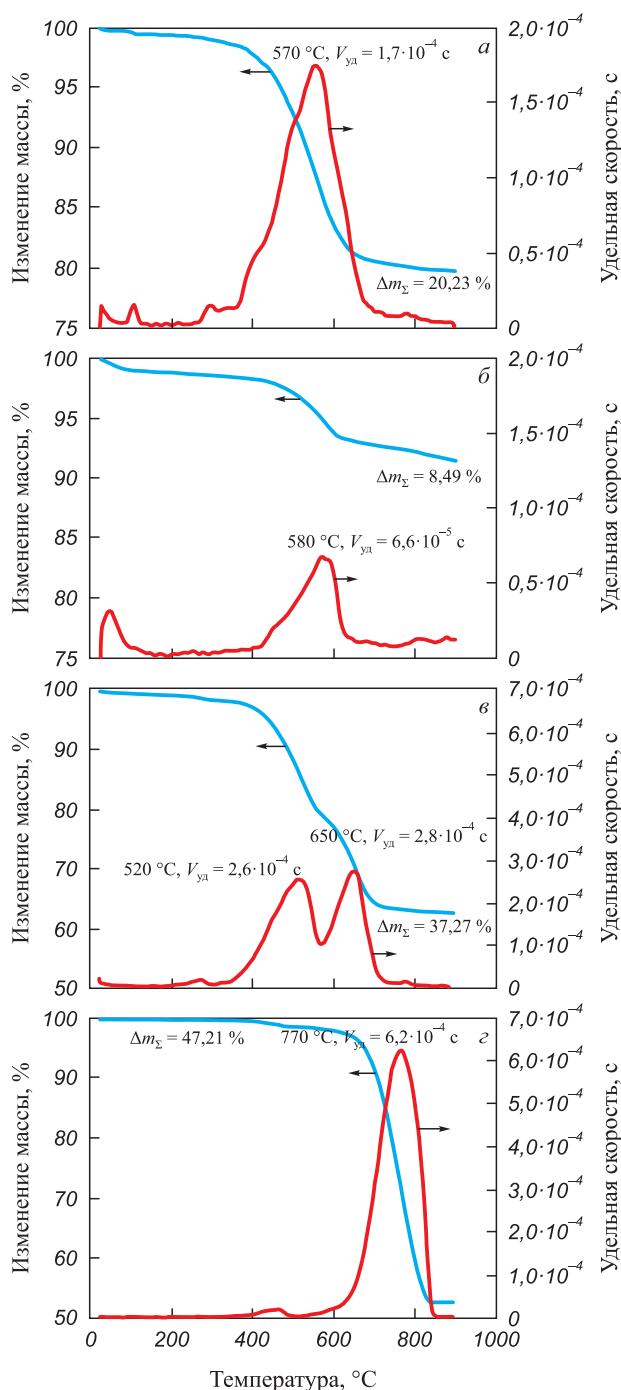


Рис. 3. Термогравиметрические кривые обработки железных руд в токе водорода в режиме линейного нагрева со скоростью 10 °С/мин: а – руда А; б – руда В; в – руда С; з – руда D

Fig. 3. Thermogravimetric curves of iron ore processing in hydrogen flow in linear heating mode at a rate of 10 °С/мин: а – ore A; б – ore B; в – ore C; з – ore D

не заканчивается при температуре 570 °С, возможно образование промежуточного продукта FeO в интервале 570 – 800 °С. Небольшой пик в районе 800 °С, вероятно, связан с разложением карбонатов. Максимальная скорость процесса достигается при температуре 570 °С.

Температурные интервалы металлизации руд *B* и *A* аналогичны (рис. 3, б), несмотря на то, что руда относится к магнетитовому типу. В составе имеются небольшие количества гидроокиси железа и гематита. На последнем этапе происходит существенная убыль массы по причине более высокого содержания кальция и, соответственно, карбонатов. Максимум скорости процесса приходится на 580 °С.

На термограмме руды *C* (рис. 3, в) наблюдаются два основных пика, что подтверждает высказанное ранее предположение о получении образца механическим смешением двух различных железорудных материалов (вероятно, природной руды и побочного продукта обогащения). Максимумы удельных скоростей фиксируются при температурах 520 и 650 °С. Более низкая температура достижения максимальной скорости может быть объяснена высокой дисперсностью частиц и, соответственно, большей реакционной способностью части рудного материала.

Процесс металлизации руды *D* (рис. 3, г) отличается от первых трех образцов. Несмотря на высокую дисперсность материала, восстановление начинается при температуре 550 °С, а максимальная скорость фиксируется при 770 °С. Это говорит о том, что данный железорудный материал является не концентратом, а, вероятно, побочным продуктом, полученным при переработке минерального сырья [21].

Для исследования поведения образцов в изотермических условиях были выбраны температуры 375 и 400 °С и образцы руд *A* и *D*, выдержку в водороде при указанных выше температурах осуществляли в течение

1 ч. На дифрактограммах исходных веществ имеются пики, соответствующие фазе гематита (рис. 4). Обработка при 375 °С приводит к полному переходу отдельной фазы гематита в магнетит для всех исследованных образцов. Кроме этого, на дифрактограммах появились пики чистого железа, что показывает принципиальную возможность получения чистого железа при температурах менее 400 °С. Существенной разницы в дифрактограммах, полученных при 375 и 400 °С, не обнаружено, что говорит о качественно одинаковых процессах, которые, вероятно, отличаются при данных температурах только глубиной протекания, но весьма незначительно.

На рис. 5 представлены результаты измерений магнитных свойств материалов в исходном состоянии и обработанных при температуре 375 °С в токе водорода в течение часа.

Измерения намагниченности исходной руды и продуктов восстанавливающего отжига проводились на некомпактированных изотропных порошках. Значения основных магнитных характеристик образцов сведены в табл. 2.

Анализ полученных полевых зависимостей говорит о том, что все образцы являются магнитомягкими со средними значениями коэрцитивной силы около 20 кА/м. Значение коэффициента прямоугольности петель (M_r/M_s) указывает на то, что образцы состоят из частиц изотропных магнитных фаз. Восстанавливающий отжиг всех образцов (кроме руды *B*) приводит к возрастанию значений намагниченности насыщения на порядок. Это объясняется тем, что в процессе термической обработки образовалось много железосодержащих фаз с высокими показателями магнитных свойств. Последнее подтверждается результатами рентгенофазового анализа. Стоит отметить, что высокая намагниченность насыщения является важной для выбора параметров магнитной сепарации железосодержащих руд.

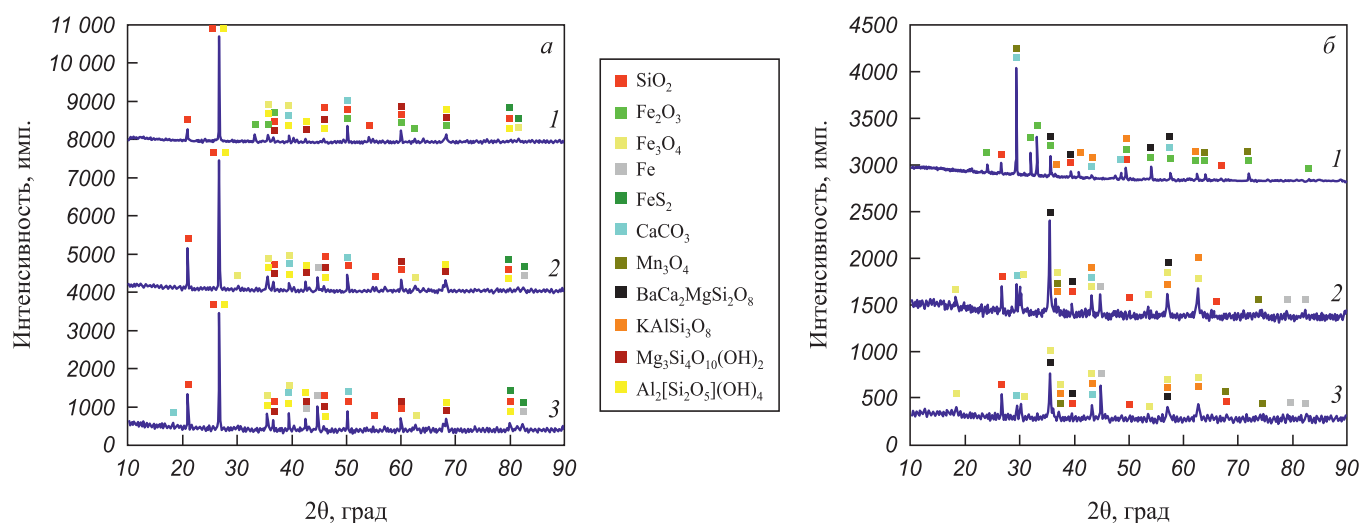


Рис. 4. Дифрактограммы руды *A* (а) и руды *D* (б) в исходном состоянии (1) и обработанных при температурах 375 (2) и 400 °С (3)

Fig. 4. XRD curves of ore *A* (a) and ore *D* (b) in the initial state (1) and processed at temperatures of 375 (2) and 400 °C (3)

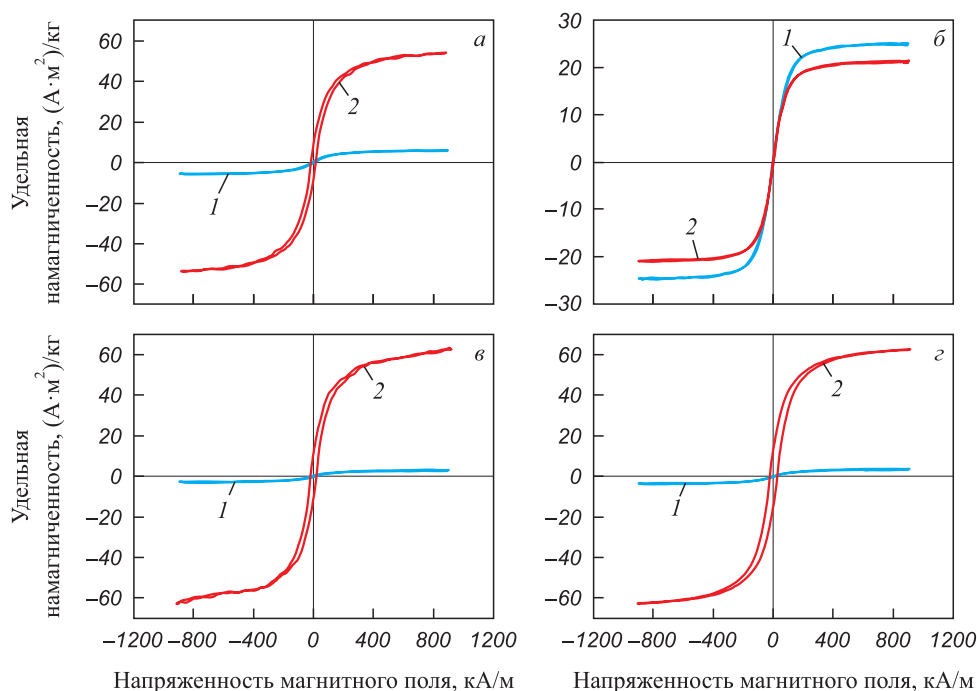


Рис. 5. Петли гистерезиса рудных материалов в исходном состоянии (1) и обработанных при температуре 375 °С (2):
а – руда А; б – руда В; в – руда С; г – руда D

Fig. 5. Hysteresis loops of ore materials in the initial state (1) and processed at a temperature of 375 °C (2):
а – ore А; б – ore В; в – ore С; г – ore D

Таблица 2. Магнитные характеристики для рудных материалов в исходном состоянии и обработанных при температуре 375 °С

Table 2. Magnetic characteristics for ore materials in the initial state and processed at a temperature of 375 °C

Образец руды		Намагниченность насыщения, (А·м²)/кг	Остаточная намагниченность, (А·м²)/кг	Коэрцитивная сила, кА/м	M_r/M_s
А	до отжига	5,50	0,49	12,7	0,09
	после отжига	53,80	8,37	15,8	0,16
В	до отжига	24,80	0,51	2,4	0,02
	после отжига	21,30	0,49	2,3	0,02
С	до отжига	2,65	10,90	19,5	4,11
	после отжига	62,00	0,48	20,1	0,01
D	до отжига	3,76	0,28	10,9	0,07
	после отжига	62,90	13,90	24,9	0,22

Таким образом, существенное повышение магнитных характеристик делает применение технологии низкотемпературного восстановления водородом железосодержащих руд перспективным для получения материалов, которые в дальнейшем могут быть подвергнуты обогащению с использованием методов магнитной сепарации.

Выводы

Показана возможность частичного восстановления водородом при температурах ниже 400 °С выбранных типов рудных материалов, в том числе с высоким

содержанием SiO_2 (более 20 мас. %) и большим средним размером частиц (более 1 мм).

Установлено, что обработка в токе водорода исследуемых железорудных образцов при температуре 375 °С в течение часа обеспечивает формирование фаз магнетита и частично восстановленного железа, при этом остатков фазы гематита на дифрактограммах образцов не обнаружено.

Обработка гематитовых железных руд в водороде при температуре 375 °С приводит существенному повышению магнитных характеристик и делает материал перспективным для обогащения с использованием методов магнитной сепарации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Rebonato R., Kainth D., Melin L., O'kane D. Optimal climate policy with negative emissions. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*. 2024;27(01):2450012. <https://doi.org/10.1142/S0219024924500122>
2. Zou C., Wu S., Yang Z., Pan S., Wang G., Jiang X., Guan M., Yu C., Yu Z., Shen Y. Progress, challenge and significance of building a carbon industry system in the context of carbon neutrality strategy. *Petroleum Exploration and Development*. 2023;50(1):210–228. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60382-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60382-3)
3. Holappa L. A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry. *Metals*. 2020;10(9):1117. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
4. Heidari A., Niknahad N., Lijana M., Fabritius T. A review on the kinetics of iron ore reduction by hydrogen. *Materials*. 2021;14(24):7540. <https://doi.org/10.3390/ma14247540>
5. Qiao Y., Wang G. Recent status of production, administration policies, and low-carbon technology development of China's steel industry. *Metals*. 2024;14(4):480. <https://doi.org/10.3390/met14040480>
6. Spreitzer D., Schenk J. Reduction of iron oxides with hydrogen – A review. *Steel Research International*. 2019;90(10):1900108. <https://doi.org/10.1002/srin.201900108>
7. Zhang J., Li K., Liu Z., Yang T. Primary Exploration of Hydrogen Metallurgy. Springer Singapore; 2024:391.
8. Lagioia G., Spinelli M.P., Amicarelli V. Blue and green hydrogen energy to meet European Union decarbonisation objectives. An overview of perspectives and the current state of affairs. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(4):1304–1322. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.044>
9. Dash S.K., Chakraborty S., Elangovan D. A brief review of hydrogen production methods and their challenges. *Energies*. 2023;16(3):1141. <https://doi.org/10.3390/en16031141>
10. Zhiznin S.Z., Shvets N.N., Timakhov V.M., Gusev A.L. Economics of hydrogen energy of green transition in the world and Russia. Part I. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(57):21544–21567. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.069>
11. Кукушкин А.Б., Кукушкин А.С., Левашова М.Г., Лисица В.С., Неверов В.С., Пшенов А.А., Сдвиженский П.А., Толстихина И.Ю., Хуснутдинов Р.И., Серов С.В., Тугаринов С.Н. Влияние термодинамической неравновесности рециклинга водорода на перезарядочную спектроскопию периферийной плазмы токамака. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез*. 2022;45(3):12–22.
Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Levashova M.G., Lisitsa V.S., Neverov V.S., Pshenov A.A., Sdvizhenskii P.A., Tolstikhina I.Yu., Khusnutdinov R.I., Serov S.V., Tugarinov S.N. The effect of thermodynamic nonequilibrium of hydrogen recycling on the charge-exchange spectroscopy of tokamak edge plasma. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Thermonuclear Fusion*. 2022;45(3):12–22.
12. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. Springer Science & Business Media; 2004:642. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2107-0>
13. Yuan S., Wang R., Zhang Q., Li Y., Gao P. Extraction and phase transformation of iron in fine-grained complex hematite ore by suspension magnetizing roasting and magnetic separation. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2022;39:1891–1901. <https://doi.org/10.1007/s11814-022-1116-1>
14. Zelenova I.M. Iron-ore concentrates in iron-powder production. *Steel in Translation*. 2009;39(9):827–830 (2009). <https://doi.org/10.3103/S0967091209090216>
15. Syrkov A.G., Prokopchuk N.R. Dispersed iron obtaining by the method of solid state hydride synthesis and the problem of hydrophobicity of metal. *CIS Iron and Steel Review*. 2021;21:16–22. <https://doi.org/10.17580/cisr.2021.01.03>
16. Москалина А.А., Чайка А.Л., Корнилов Б.В., Лебедь В.В., Джигота М.Г. Повышение энергоэффективности доменной печи путем вдувания предварительно нагретого ПУТ с оксидами железа. *Сталь*. 2021;(7):8–13.
Moskalina A.A., Chaika A.L., Kornilov B.V., Lebed' V.V., Dzhigota M.G. Improvement of blast furnace energy efficiency by injection of preheated pulverized coal fuel with iron oxides. *Steel in Translation*. 2021;51(7):468–474. <https://doi.org/10.3103/S0967091221070056>
17. Бородулин А.В., Чайка А.Л., Сохацкий А.А., Корнилов Б.В. Исследование влияния вдувания в горн пылевидных оксидов железа и предварительно нагретого пылеугольного топлива на показатели тепловой работы доменной печи. *Экология и промышленность*. 2016;(2(47)):48–53.
Borodulin A.V., Chaika A.L., Sokhatskii A.A., Kornilov B.V. Investigation of impact of injection of pulverized ferric oxides and preheated pulverized-coal fuel in hearth to indexes of heat operation of blast furnace. *Ekologiya i promyshlennost'*. 2016;(2(47)):48–53. (In Russ.).
18. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. *Металлургия железа*. Москва: Академкнига; 2007:464.
19. Богданди Л.Ф., Энгель Г.-Ю. Восстановление железных руд/ Пер. с нем. Е.Ф. Вегмана, Ю.С. Юсфина, под ред. А.Н. Похвиснева. Москва: Металлургия; 1971:519.
20. He J., Li K., Zhang J., Conejo A.N. Reduction kinetics of compact hematite with hydrogen from 600 to 1050 °C. *Metals*. 2023;13(3):464. <https://doi.org/10.3390/met13030464>
21. Lileev A.S., Konyukhov Yu.V., Zhukov D.G., Khanna R. Properties of nanocrystalline magnetic powders of the Fe–O system Obtained from iron ore dust using magnetic pulse processing. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2024;15(3):883–888. <https://doi.org/10.1134/S2075113324700333>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Юрий Владимирович Конюхов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
ORCID: 0000-0003-0219-4809
E-mail: ykonukhov@misis.ru

Yurii V. Konyukhov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Mineral Processing and Industrial Wastes Recycling, National University of Science and Technology "MISIS"
ORCID: 0000-0003-0219-4809
E-mail: ykonukhov@misis.ru

Рита Ханна, PhD, профессор, Университет Нового Южного Уэльса, Институт материаловедения и инженерии
ORCID: 0009-0004-3629-6891
E-mail: rita.khanna66@gmail.com

Никита Андреевич Масленников, ассистент кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: masl.nik2000@gmail.com

Кэцзян Ли, PhD, профессор, Пекинский университет науки и технологии, Институт металлургической и экологической инженерии
ORCID: 0000-0002-7807-8241
E-mail: likejiang@ustb.edu.cn

Цзэн Лян, аспирант, Пекинский университет науки и технологии, Институт металлургической и экологической инженерии
E-mail: zeng_l99@163.com

Игорь Николаевич Бурмистров, д.т.н., ведущий эксперт кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
ORCID: 0000-0003-0776-2465
E-mail: burmistrov.in@misis.ru

Дмитрий Юрьевич Карпенков, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник кафедры магнетизма, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ORCID: 0000-0001-8686-2303
E-mail: karpenkov_d_y@mail.ru

Сергей Владимирович Кашевский, магистрант кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: serg.kashevsky@gmail.com

Максим Владимирович Кравченко, к.т.н., директор Ташкентского филиала, Национальный исследовательский университет «МЭИ»
E-mail: Kravchenkomv@mpei.ru

Rita Khanna, PhD, Prof., University of New South Wales, Institute of Materials Science and Engineering
ORCID: 0009-0004-3629-6891
E-mail: rita.khanna66@gmail.com

Nikita A. Maslennikov, Assistant of the Chair of Mineral Processing and Industrial Wastes Recycling, National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: masl.nik2000@gmail.com

Kejiang Li, PhD, Prof., School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing
ORCID: 0000-0002-7807-8241
E-mail: likejiang@ustb.edu.cn

Zeng Liang, PhD Student, School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing
E-mail: zeng_l99@163.com

Igor' N. Burmistrov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Expert of the Chair of Functional Nanosystems and High-Temperature Materials, National University of Science and Technology "MISIS"
ORCID: 0000-0003-0776-2465
E-mail: burmistrov.in@misis.ru

Dmitrii Yu. Karpenkov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Chair of Magnetism, M.V. Lomonosov Moscow State University
ORCID: 0000-0001-8686-2303
E-mail: karpenkov_d_y@mail.ru

Sergei V. Kashevskii, MA Student of the Chair of Functional Nanosystems and High-Temperature Materials, National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: serg.kashevsky@gmail.com

Maksim V. Kravchenko, Cand. Sci. (Eng.), Director of Branch in Tashkent, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
E-mail: Kravchenkomv@mpei.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Ю. В. Конюхов – идея работы, научное руководство, разработка методологии исследования, написание окончательного варианта рукописи.

Р. Ханна – концептуализация, подготовка обзора и редактирование текста.

Н. А. Масленников – проведение исследований, анализ и обработка данных.

К. Ли – участие в написании черновой версии рукописи, рецензирование и редактирование.

Ц. Лян – рецензирование и редактирование.

И. Н. Бурмистров – участие в описании и обсуждении результатов, рецензирование и редактирование.

Д. Ю. Карпенков – проведение измерений, анализ, обработка данных и их обсуждение.

С. В. Кашевский – проведение измерений и обработка данных.

М. В. Кравченко – рецензирование и редактирование.

Yu. V. Konyukhov – formation of the article idea, scientific guidance, writing the final version of the manuscript.

R. Khanna – conceptualization, review and editing.

N. A. Maslennikov – carrying out research, data analysis and processing.

K. Li – participation in draft writing, review and editing.

Z. Liang – review and editing.

I. N. Burmistrov – participation in the description and discussion of the results, review and editing.

D. Yu. Karpenkov – carrying out research, analysis, data processing and discussion.

S. V. Kashevskii – carrying out research, data processing.

M. V. Kravchenko – review and editing.

Поступила в редакцию 11.10.2024

После доработки 17.10.2024

Принята к публикации 17.10.2024

Received 11.10.2024

Revised 17.10.2024

Accepted 17.10.2024