

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

УДК 669.053.2

DOI: 10.14529/met160408

ТВЕРДОФАЗНОЕ ПРЕДВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА – ОСНОВА БЕЗОТХОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫХ РУД И ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

В.Е. Рощин, С.П. Салихов, А.Д. Поволоцкий

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

На основе развиваемой авторами электронной теории восстановления предложены технологические схемы и набор оборудования для безотходной технологии переработки комплексных железосодержащих руд и техногенных отходов. Восстановление представляется как физический процесс обмена электронами между восстановителем и катионами металлов в оксидах. Выделение металлической фазы происходит с достаточно большой скоростью даже внутри кусков руды в окружении ионов кислорода без непосредственного контакта металла с восстановителем и без плавления руды и металла.

В результате твердофазного восстановления при относительно низкой температуре и использовании в качестве восстановителя обычного энергетического угля получается металлооксидный композит, содержащий практически чистое первородное железо и неразбавленный шлакообразующими добавками концентрат оксидов невосстановленных металлов.

Использованием предложенных вариантов технологии решается вопрос не только получения железа из комплексных руд, но и их безотходной переработки с извлечением всех ценных компонентов. Оксидная фаза в металлооксидном композите, получаемом при восстановлении железа из сидеритовой и ильменитовой руд, представлена в основном тугоплавкими оксидами магния или титана.

Переработка техногенных отходов на микрометаллургических заводах по предлагаемой схеме позволяет полностью утилизировать шлаки и шламы с получением востребованных продуктов.

Ключевые слова: титаномагнетит; ильменит; сидерит; металлургические шлаки; твердофазное предвосстановление; магнезиальный флюс; концентрат диоксида титана.

Извлекать железо из руды люди начали более трёх тысяч лет назад. Основной современный технологический процесс извлечения железа из руд – доменный сформировался еще в донаучный период, когда науки в современном понимании вообще не существовало. Современная теория восстановления разработана во второй половине XX века на базе законов наиболее развитой к тому времени науки – химии применительно к уже сложившейся технологии. Поскольку доменный процесс на протяжении веков развивался как процесс переработки богатых железных руд, то и теория удовлетворительно описывает восстановление металлов из монооксидов и богатых руд. Но так как качество исходных материалов неуклонно ухудшается, доменная плавка требует всё более сложной подготовки шихтовых ма-

териалов с получением дорогих промежуточных продуктов – кокса, агломерата или окатышей. Операции получения таких материалов, особенно из комплексных руд, трудоёмки, ресурсо- и энергозатратны. Они осуществляются в уникально больших металлургических агрегатах, требуют больших трудовых и финансовых затрат и наносят огромный ущерб окружающей среде. И хотя к настоящему времени разработаны и ограниченно используются способы внедоменного получения чугуна по технологиям Cogex, Finex и другим, а также способы бескоксовой металлизации окатышей и брикетов в шахтных печах (Midrex, NYL и другие) или на поду (FASTMET и FASTMELT, ITmk3 и другие), в основе их работы лежат всё те же теоретические представления. Поэтому и доменная

печь, и агрегаты бескоксовой металлургии имеют общий существенный недостаток – они непригодны для переработки комплексных руд, таких как титаномагнетитовые, ильменитовые, бакальские сидеритовые (сидероплезитовые) и другие, поскольку после восстановления железа из них образуются тугоплавкие шлаки. Такие руды ограниченно используют в качестве добавок к традиционному рудному сырью, причём с потерей ценных компонентов этих руд – оксидов титана, магнезия и других, которые в шлаках разбавляются и выбрасываются в отвалы. Разбавление этих ценных компонентов для снижения температуры плавления шлаков и полная их потеря предполагаются и в широко рекламируемом процессе ITmk3, который авторы [1] предлагают использовать для получения гранулированного чугуна из смеси комплексных руд.

Для переработки комплексного сырья с извлечением всех ценных компонентов нужны новые технологии и процессы, основанные на достижениях современной науки.

На основе представлений физики металлов, химии и физики твёрдого тела о несовершенных кристаллах, квантовой механики об особенностях распределения и перемещения электронов в металлах и ионных полупроводниках нами разработаны новые научные принципы твердофазного селективного восстановления металлов в кристаллической решётке оксидов [2–7] и базирующиеся на этом основы безотходной технологии переработки кусковых комплексных руд [8–14] и техногенных отходов [15, 16].

В основе этих процессов лежит представление о механизме восстановления как о физическом процессе обмена электронами между восстановителем и катионами металлов в оксидах. Такой обмен электронами возможен без плавления руды и тотального удаления из неё кислорода, как это предполагается современной теорией восстановления. При этом восстановление металла и выделение металлической фазы происходят с достаточно большой скоростью даже внутри кусков руды в окружении ионов кислорода без непосредственного контакта металла с восстановителем и без плавления руды и металла. Такое твердофазное восстановление успешно реализуется также при использовании низкокачественного энергетического угля в качестве восстановителя и при относительно низкой (900...1200 °С) температуре. А поскольку вы-

деление металла происходит внутри оксидной фазы без контакта с углеродом, то металл не растворяет углерод и не загрязняется примесями из восстановителя, атмосферы или футеровки агрегата. В результате такого процесса получается металлооксидный композит, содержащий чистое первородное железо и неразбавленный шлакообразующими добавками концентрат оксидов второго компонента комплексной руды – оксида титана, магнезия и других (рис. 1). Комплексные руды можно подвергать металлзации в кусковом виде, при этом целесообразно использовать кусочки руды размером 10...20 мм.

Поскольку оксидная фаза в металлооксидном композите, получаемом при восстановлении железа из сидеритовой и ильменитовой руд, представлена в основном тугоплавкими оксидами магнезия и титана, то расплавить такие композиты весьма затруднительно. Однако при непрерывной загрузке в электропечь сыпучего композиционного материала он легко растворяется в шлаке, металл в виде капель оседает в металлическую ванну, а тугоплавкие оксиды накапливаются в шлаке, что вызывает его «сворачивание». Такой шлак, содержащий до 80 % MgO или до 90 % TiO₂, необходимо принудительно удалять через рабочее окно. В результате для реализации технологического процесса переработки комплексных руд на сталь и оксидный концентрат второго металла наиболее целесообразным представляется технологический комплекс в составе восстановительного агрегата и дуговой сталеплавильной печи (рис. 3). Один такой комплекс в состоянии производить 100...300 тыс. т стали в год. Стальной полупродукт на основе первородного железа далее целесообразно превращать в качественную стальную заготовку или продукты с высокой добавленной стоимостью – тонкую полосу, аморфную ленту, железный порошок для изготовления изделий сложной формы по технологии компьютерного прототипирования и т. д. Концентрат оксидов титана, получаемый из ильменитовых руд, можно использовать для производства диоксида титана (рис. 3, а), а концентрат (шлак) из титаномагнетитовых руд – для производства ферротитана.

Металломагнезиальный композит, получаемый при переработке сидеритовых руд, в неразделённом виде может быть использован в качестве дополнительного шихтового мате-

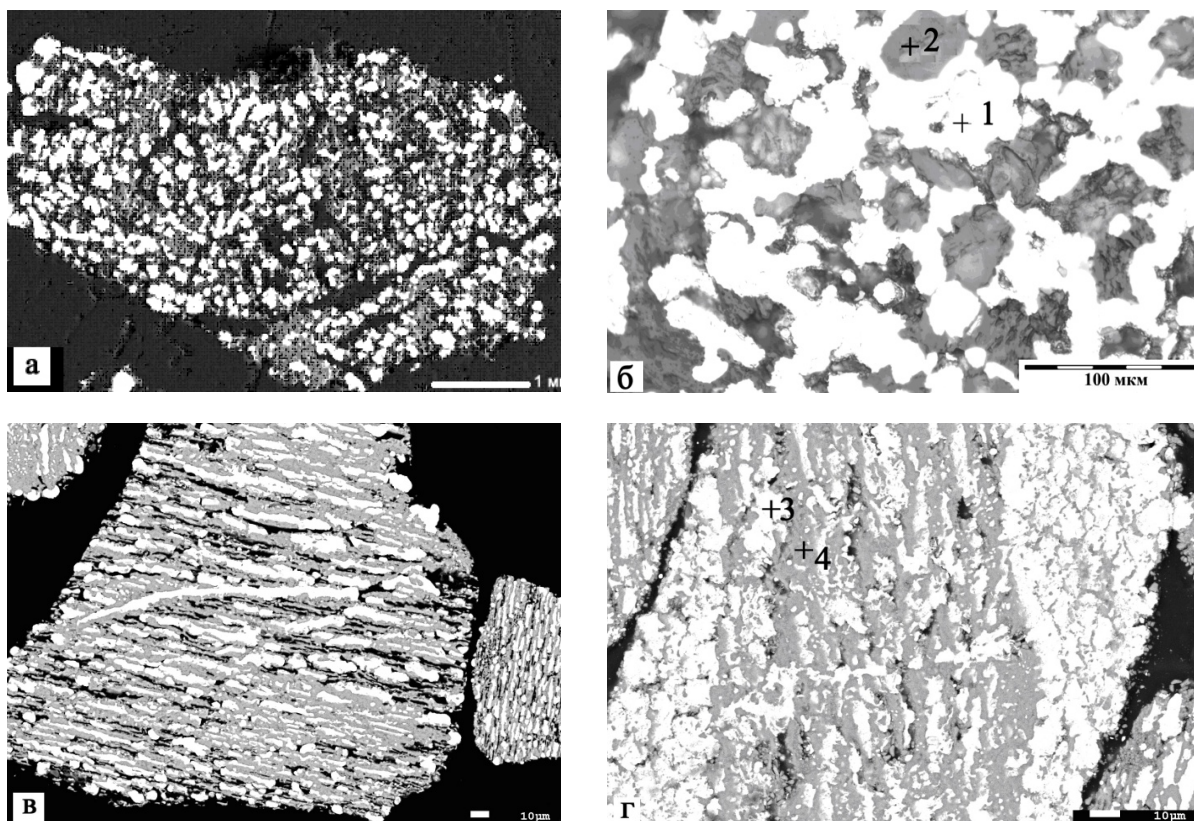


Рис. 1. Metalлооксидные композиты Fe–MgO (а, б) и Fe–TiO₂ (в, г), полученные из сидеритовой и ильменитовой руд. Состав фаз в точках, ат. %: 1 – 100,00 Fe; 2 – 44,59 Mg; 37,66 O; 6,20 Fe; 11,54 Mn; 3 – 98,04 Fe; 1,96 Ti; 4 – 67,71 O; 0,99 Fe; 29,33 Ti

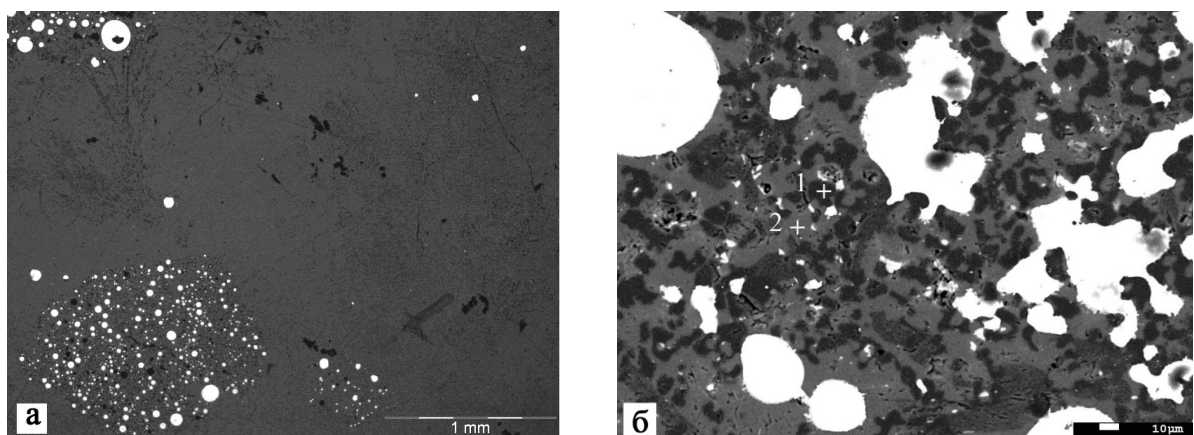


Рис. 2. Растворение металлооксидного композита Fe–MgO в шлаке (а) и состав оксидных фаз в объёме растворяющегося композита (б), мас. %: 1 – 80,08 MgO; 0,59 Al₂O₃; 0,22 SiO₂; 0,29 CaO; 7,84 MnO; 10,98 FeO; 2 – 25,74 MgO; 0,80 Al₂O₃; 37,57 SiO₂; 26,74 CaO; 5,79 MnO; 3,35 FeO

риала в существующем производстве стали в кислородных конвертерах и дуговых сталеплавильных печах «большой» металлургии как источник первородного железа и заменитель магниального флюса, присаживаемого для увеличения стойкости футеровки (рис. 3, б). Таким образом, использованием предложенных вариантов технологии решается вопрос не только получения железа из комплексных

руд, но и их безотходной переработки с извлечением всех ценных компонентов.

Технологический комплекс в составе восстановительного агрегата и дуговой сталеплавильной печи эффективно также использовать для переработки и утилизации техногенных отходов, в частности шлаков и шламов медеплавильного, никелевого, глинозёмного производств (рис. 4). Некоторые из таких отходов

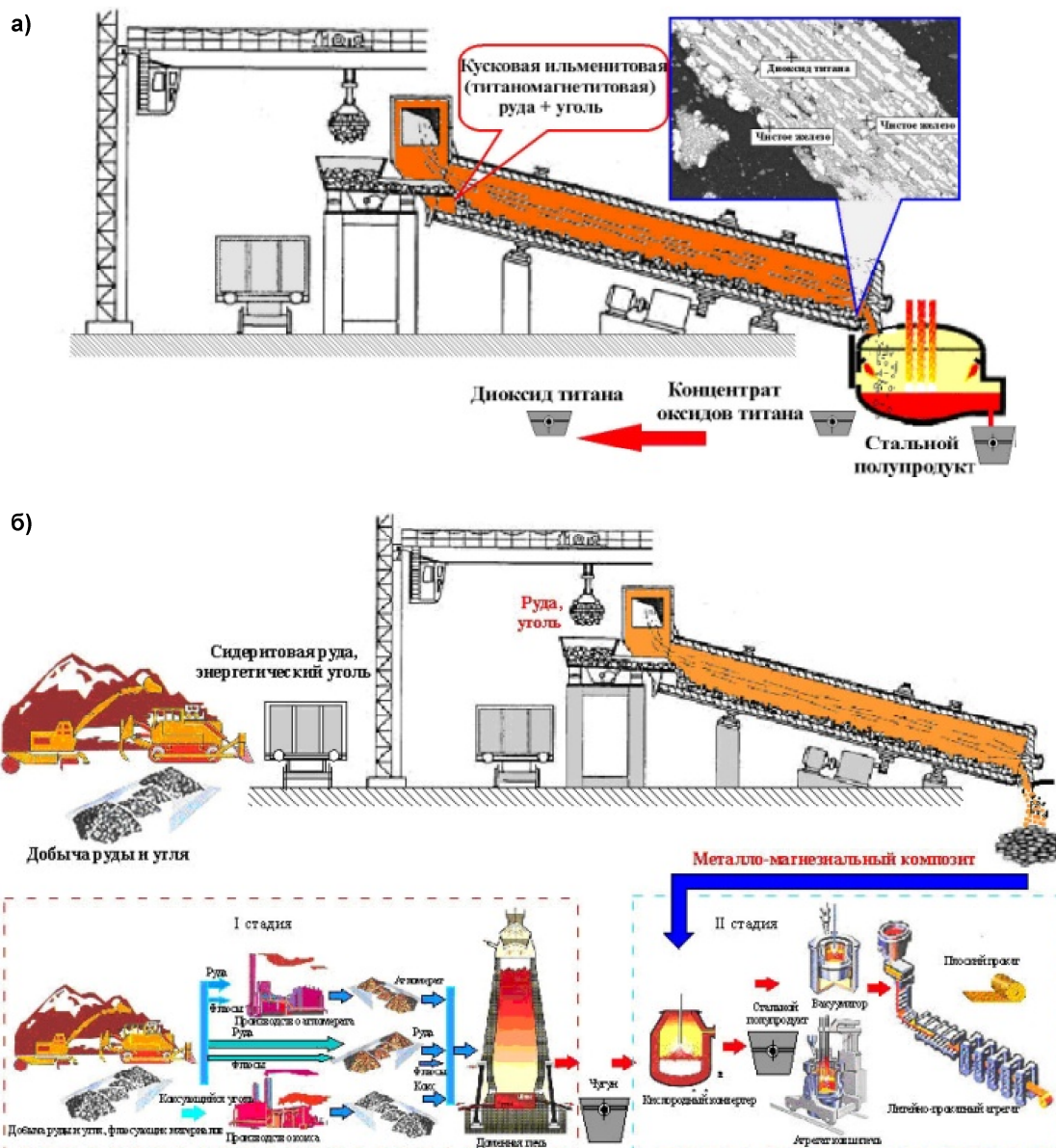


Рис. 3. Схема переработки ильменитовой и титаномагнетитовой руды в ДСП с получением стали и концентрата оксидов титана (а) и сидеритовой руды в конвертере (б)

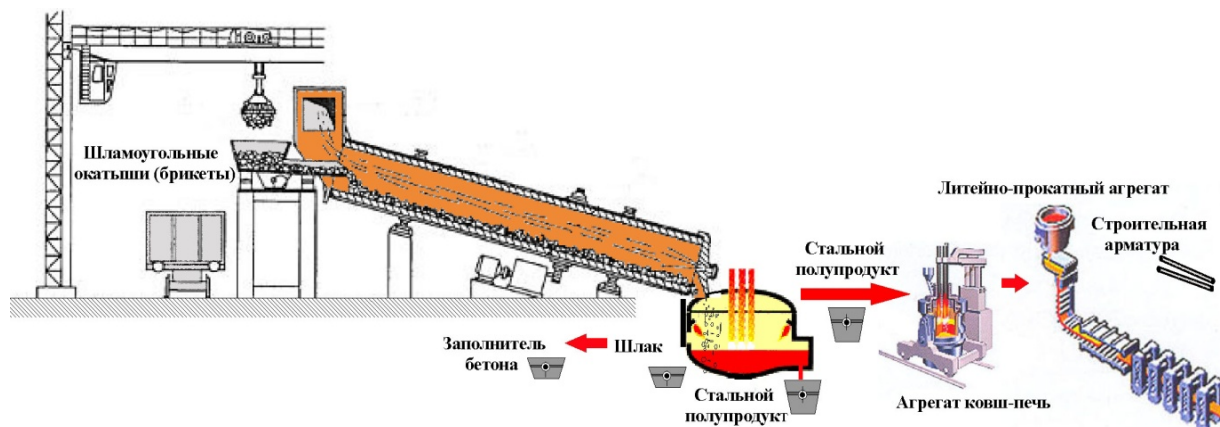


Рис. 4. Технологическая схема микрометаллургического комплекса по переработке шлаков медеплавильного производства на строительную арматуру

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

в ограниченных масштабах пытаются использовать в качестве небольших добавок в шихту доменных печей, например, вводя их в состав аглошихты [17, 18]. Однако наличие в составе этих материалов значительного количества вредных примесей, в частности, цветных металлов, серы и щелочей, делает невозможным их массовое использование в «большой» металлургии. В то же время медь уменьшает склонность стали к атмосферной коррозии, и её содержание в металле строительного сортамента допускается на уровне порядка 1 %. Таким образом, чёрный металл с повышенным содержанием меди можно использовать при производстве металла строительного назначения. Однако производить такой металл аглодоменным процессом и использовать его только при выплавке весьма ограниченного сортамента невозможно, так как невозможно исключить попадание меди с чугуном в конструкционную сталь. Решением этой проблемы может быть организация относительно небольшого производства железа из шлаков, например, медеплавильного производства специально для получения медьсодержащей стали строительного сортамента (см. рис. 4). При этом арматура из медьсодержащей стали, использованная при изготовлении железобе-

тона, рециклингу не подвергается, что исключает возможность попадания меди в сталь машиностроительного назначения.

Заводы цветной металлургии в большом объёме покупают или изготавливают из покупного металла также мелющие тела – шары и цельпессы для размола руды. Как показали наши исследования, из медеплавильных шлаков плавлением предвосстановленных шлаков и шламов с использованием указанного комплекса оборудования легко получаются чугуны мелющие тела с высоким уровнем эксплуатационных свойств, несмотря на высокое (~ 1 %) содержание в чугуне серы и меди.

Переработка техногенных отходов на микрометаллургических заводах по предлагаемой схеме позволяет полностью утилизировать шлаки и шламы с получением нескольких востребованных продуктов: цинкового концентрата, строительной арматуры, чугунов мелющих тел, легированной медью стали, чугунов мелющих тел, легированной медью стали и строительного песка (рис. 5). Экономическая целесообразность организации такого производства вытекает из возможности получения товарных продуктов из уже добытого и складированного сырья, за хранение которого, кроме того, приходится платить экологические налоги.

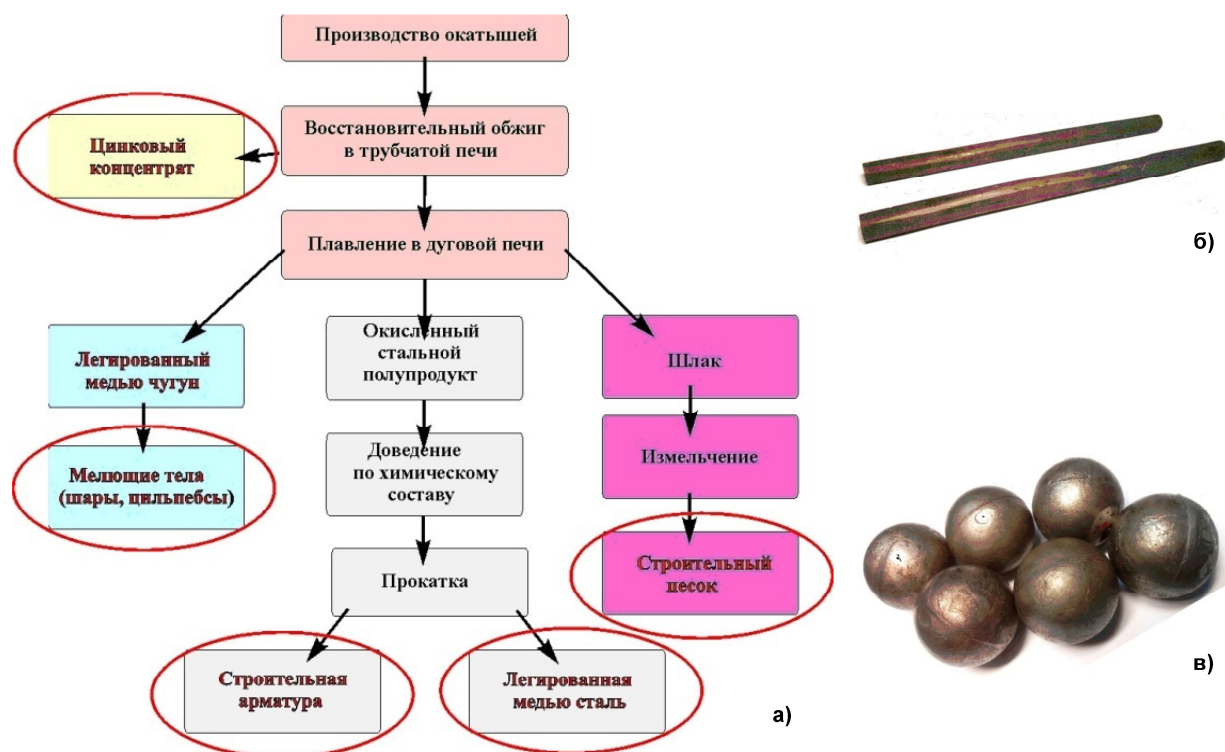


Рис. 5. Схема безотходной переработки медеплавильных шлаков (а), строительная арматура (б) и чугуны мелющие шары (в), полученные из восстановленного железа

Итак, технология селективного восстановления и извлечения железа может применяться для решения нескольких задач:

– *получения чистого железа* – высококачественного сырья, которое может использоваться для изготовления широкого спектра металлургических изделий, в том числе холоднокатаного листового проката – продукта с наибольшей добавленной стоимостью в черной металлургии, рынок которого является одним из самых доходных и динамично развивающихся;

– *создания основной части производственной линии металлургических предприятий с малыми объемами производства* – так называемых микрометаллургических заводов для производства уникальной потребительской продукции, например, сердечников силовых трансформаторов из аморфной или нанокристаллической ленты, металлических микропорошков для изготовления деталей сверхсложной геометрической формы методом лазерного спекания по компьютерной 3D-модели и др.;

– при работе с рудами, содержащими оксиды титана, – *получения ценных продуктов на основе титана*: титанового концентрата, пигментного диоксида титана (объем рынка пигментного диоксида титана в РФ составляет около 85 000 т/год и на данный момент полностью занят иностранными игроками), титановой губки или ферротитана;

– *железромагнетитовый композит*, получаемый из сидеритовой руды, можно использовать в неразделённом состоянии в сталеплавильном производстве в качестве заменителя чугуна с целью разбавления примесей, вносимых металлическим ломом, и как источник поступления в шлак MgO, тормозящего эрозию футеровки;

– *полной утилизации техногенных отходов* с получением нескольких товарных продуктов – строительной стали, чугунных мелющих тел, цинкового концентрата, строительного песка.

Реализация производства по предлагаемой схеме селективного восстановления и извлечения железа из комплексных руд и техногенных отходов особенно актуальна для Южно-Уральского региона, где имеются многомиллиардные запасы комплексных руд (Бакальское месторождение сидеритов, Медведовское, Копанское, Суроямское, Амамбаевское и другие месторождения титаномagnetитов и ильменитов), скопились огромные запасы

медеплавильных шлаков и шламов (г. Карабаш), производства никеля (г. Верхний Уфалей), имеется развитая инфраструктура, недостаточно загруженное металлургическое оборудование и квалифицированные кадры в моногородах металлургов (Златоуст, Аша, Сатка, Карабаш, Верхний Уфалей).

Литература

1. *Металлизация шпатовых железняков и титаномagnetитов Челябинской области с получением гранулированного чугуна* / Н.В. Панишев, В.Ф. Рашинов, Б.А. Дубровский, Е.В. Редин // Тезисы докладов участников восьмого промышленного форума «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении». – Челябинск: Челябингипромез, 2016. – С. 48–49.

2. *Роцин, В.Е. Физические основы селективного восстановления металлов в кристаллической решётке комплексных оксидов* / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2013. – № 5. – С. 44–54.

3. *Роцин, В.Е. Селективное восстановление металлов в решётке комплексных оксидов* / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // Металлы. – 2013. – № 2. – С. 12–20.

4. *Роцин, В.Е. Физика химических реакций окисления и восстановления металлов в твердой фазе* / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2013): тр. междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 225–231.

5. *Роцин, В.Е. Физика процессов окисления и восстановления металлов в твердой фазе* / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // Металлы. – 2015. – № 3. – С. 19–25.

6. *Роцин, В.Е. Развитие теории восстановления металлов* / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVI Междунар. конф.: в 2 ч. / под ред. В.Е. Роцина. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2015. – Ч. 1. – С. 26–35.

7. *Роцин, В.Е. Развитие теории карбо-термического восстановления и высокотемпературного окисления железа в кристаллической решётке оксидов* / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // Металлургия: технологии, инновации, качество / под общ. ред. Е.В. Протопопова. – Новокузнецк, 2015. – С. 155–160.

8. *Асанов, А.В. Твердофазная металлизация железо-ванадиевых концентратов и жид-*

кофазное разделение продуктов их восстановления / А.В. Асанов, В.Е. Роцин, А.В. Роцин // *Металлы*. – 2010. – № 6. – С. 35–38.

9. Роцин, В.Е. Возможности двухстадийной переработки концентратов титаномагнетитовых руд / В.Е. Роцин, А.В. Асанов, А.В. Роцин // *Электрометаллургия*. – 2010. – № 6. – С. 15–25.

10. Роцин, В.Е. Южно-Уральские титаномагнетиты как источник первородного железа для сталеплавильной и диоксида титана для титановой промышленности / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // *Сборник трудов XIII Конгресса сталеплавильщиков*. – Екатеринбург: ООО «Эзапринт», 2014. – С. 467–471.

11. Роцин, В.Е. Основы селективного восстановления железа в титаномагнетитах с получением концентрата оксидов титана / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // *Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: тр. науч.-практ. конф.* – Екатеринбург: Изд-во «Уральский рабочий», 2015. – С. 68–73.

12. Брындин, С.А. Растворение металлофлюса в шлаковом расплаве / С.А. Брындин, А.В. Роцин, Д.А. Черепанов // *Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XV Междунар. науч. конф.: в 2ч. / под ред. В.Е. Роцина*. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – Ч. 2. – С. 45–48.

13. Технология и оборудование для прямой комплексной переработки кусковой сидеритовой руды при производстве стали / В.Е. Роцин, С.А. Брындин, С.П. Салихов, А.В. Роцин // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2016. – № 1. – С. 22–28.

14. Получение ожелезненного магнетитового флюса и первородного железа путём

металлизации кусковой сидеритовой руды / В.Е. Роцин, С.П. Салихов, А.В. Роцин, С.А. Брындин // *Новые огнеупоры*. – 2016. – № 3. – С. 24–25.

15. Роцин, В.Е. Теория селективного твердофазного восстановления – научная основа для создания технологий переработки железосодержащих техногенных отходов / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // *Труды Конгресса с международным участием и элементами школы молодых учёных «Фундаментальные исследования и экспериментальные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований»*. – Екатеринбург: УрО РАН, 2014. – С. 41–46.

16. Потапов, К.О. Пирометаллургическое извлечение железа из отходов медеплавильного производства / К.О. Потапов, В.Д. Поволоцкий, В.Е. Роцин // *Труды Конгресса с международным участием и элементами школы молодых учёных «Фундаментальные исследования и экспериментальные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований»*. – Екатеринбург: УрО РАН, 2014. – С. 544–548.

17. Влияние низкощелочного красного шлама на свойства и микроструктуру агломерата из шихтовых материалов ОАО «Уральская сталь» / Е.В. Ширяева, Г.С. Подгородецкий, Т.Я. Малышева и др. // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. – 2014. – № 1. – С. 14–19.

18. Влияние низкощелочных красных шламов на состав и структуру агломерационной шихты из железорудных концентратов различного генезиса / Е.В. Ширяева, Г.С. Подгородецкий, Т.Я. Малышева и др. // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. – 2014. – № 9. – С. 13–17.

Роцин Василий Ефимович, д-р техн. наук, профессор кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; goshchinve@susu.ru.

Салихов Семён Павлович, старший преподаватель кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; salikhovsp@susu.ru.

Поволоцкий Александр Давидович, канд. техн. наук, директор НОЦ «Металлургия», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vdp1947@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 октября 2016 г.

SOLID-PHASE PRE-REDUCTION OF IRON AS A BASIS OF NON-WASTE TECHNOLOGIES OF PROCESSING COMPLEX ORES AND INDUSTRIAL WASTE

V.E. Roshchin, roshchinve@susu.ru,
S.P. Salikhov, salikhovsp@susu.ru,
A.D. Povolotskiy, vdp1947@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Based on the theory of electronic reduction developed by the authors technological schemes and a set of equipment are proposed for non-waste technology of processing complex iron ores and industrial waste. Reduction appears as a physical process of the electronic exchange between the reducing agent and metal cations in oxides. Isolation of the metallic phase takes place at a high rate even inside ore lumps surrounded by oxygen ions without direct contact of metal and reducing agent and without melting ore and metal.

The result of the solid-phase reduction at a relatively low temperature using common power coal as reducing agent is a metal-oxide composite containing pure iron and a concentrate of unreduced metal oxides undiluted with slag-forming additives.

The use of the proposed technology solves not only the problem of producing iron from complex ores, but also their non-waste processing with the extraction of valuable components. The oxide phase in the metal-oxide composite resulting from the reduction of siderite iron ore and ilmenite consists mainly from refractory magnesium or titanium oxides.

Processing of anthropogenic waste on micrometallurgical plants by the proposed scheme allows to completely dispose of wastes and mud to produce commercial products.

Keywords: titanomagnetite; ilmenite; siderite; metallurgical slag; solid-phase pre-reduction; magnesia flux; concentrate of titanium dioxide.

References

1. Panishev N.V., Rashnikov V.F., Dubrovskiy B.A., Redin E.V. [Metallization of Siderite and Titanomagnetite of the Chelyabinsk Region to Produce Granular Pig Iron]. *Tezisy докладov uchastnikov vos'mogo promyshlennogo foruma "Rekonstruktsiya promyshlennykh predpriyatiy – proryvnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii"* [Abstracts of the Participants in the Eighth Industrial Forum "Reconstruction of Industrial Enterprises – Breakthrough Technologies in Metallurgy and Machine Building"]. Chelyabinsk, Chelyabgiprommez Publ., 2016, pp. 48–49. (in Russ.)
2. Roshchin V.E., Roshchin A.V. Selective Reduction of Metals in the Crystal Lattice of Complex Oxides: Physical Principles. *Steel in Translation*, 2013, vol. 43, no. 5, pp. 278–287. DOI: 10.3103/S096709121305015X
3. Roshchin V.E., Roshchin A.V. [Selective Reduction of Metals in the Lattice of Complex Oxides]. *Metally*, 2013, no. 2, pp. 12–20. (in Russ.)
4. Roshchin V.E., Roshchin A.V. [Physics of Chemical Reactions of Oxidation and Reduction of Metals in the Solid Phase]. *Sovremennye metallicheskie materialy i tekhnologii* [Modern Technology and Metal Materials]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2013, pp. 225–231. (in Russ.)
5. Roshchin V.E., Roshchin A.V. [Physics of the Processes of Oxidation and Reduction of Metals in the Solid Phase]. *Metally*, 2015, no. 3, pp. 19–25. (in Russ.)
6. Roshchin V.E., Roshchin A.V. [Development of the Theory of Metals Reduction]. *Materialy XVI Mezhdunarodnoy konferentsii "Sovremennye problemy elektrometallurgii stali"* [Proceedings of the XVI International Conference "Modern Problems of Electric Steelmaking"]. Vol. 2. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2015, pp. 26–35. (in Russ.)
7. Roshchin V.E., Roshchin A.V. [Development of the Theory of Carbothermic Reduction and High-Temperature Oxidation of Iron Oxides in the Crystal Lattice]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy: Technology, Innovation, Quality]. Novokuznetsk, Siberian St. Industrial Univ. Publ., 2015, pp. 155–160. (in Russ.)
8. Roshchin V.E., Asanov A.V., Roshchin A.V. Solid-Phase Prereduction of Iron-Vanadium Concentrates and Liquid-Phase Separation of the Products of Their Reduction. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010, vol. 2010, no. 11, pp. 1001–1008. DOI: 10.1134/S0036029510110029

9. Roshchin V.E., Asanov A.V., Roshchin A.V. [Possibilities of a Two-Step Processing of Titanomagnetite Ore Concentrates]. *Elektrometallurgiya*, 2010, no. 6, pp. 15–25. (in Russ.)

10. Roshchin V.E., Roshchin A.V. [South Ural Titanomagnetite As the Source of Iron for the Steelmaking and Titanium Dioxide for Titanium Industry]. *Sbornik trudov XIII Kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the XIII Congress of Steelmakers]. Ekaterinburg, Ezaprint Publ., 2014, pp. 467–471. (in Russ.)

11. Roshchin V.E., Roshchin A.V. [Fundamentals of Selective Reduction of Iron in Titanomagnetite to Give Titanium Oxide Concentrate]. *Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennykh fundamental'nykh issledovaniy i NIOKR. Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects for the Development of Metallurgy and Mechanical Engineering Using Completed Basic Research and R&D. Proceedings of the Scientific-Practical Conference]. Ekaterinburg, Ural Worker Publ., 2015, pp. 68–73. (in Russ.)

12. Bryndin S.A., Roshchin A.V., Cherepanov D.A. [Dissolution of Metal Flux in the Melted Slag]. *Materialy XV Mezhdunarodnoy konferentsii "Sovremennye problemy elektrometallurgii stali"* [Proceedings of the XV International Conference "Modern Problems of Electric Steelmaking"]. Vol. 2. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2013, pp. 45–48. (in Russ.)

13. Roshchin V.E., Bryndin S.A., Salikhov S.P., Roshchin A.V. [Technology and Equipment for the Direct Complex Processing of Siderite Lump Ore for Steel Production]. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2016, no 1, pp. 22–28. (in Russ.)

14. Roshchin V.E., Salikhov S.P., Roshchin A.V., Bryndin S.A. [Getting Ferruginous Magnesia Flux and Original Iron by Metallization from Siderite Ore Lumps]. *Novye ogneupory*, 2016, no. 3, pp. 24–25. (in Russ.)

15. Roshchin V.E., Roshchin A.V. [The Theory of Selective Solid-Phase Reduction – the Scientific Basis for the Creation of Technologies for Processing Ferruginous Man-Made Waste]. *Trudy Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i elementami shkoly molodykh uchenykh "Fundamental'nye issledovaniya i eksperimental'nye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy"* [Proceedings of the Congress with International Participation and Elements of School of Young Scientists "Fundamental Research and Experimental Development of Processing and Recycling of Technogenic Formations"]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 41–46. (in Russ.)

16. Potapov K.O., Povolotskiy V.D., Roshchin V.E. [Pyrometallurgical Extraction of Iron from Copper Smelting Production Waste] *Trudy Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i elementami shkoly molodykh uchenykh "Fundamental'nye issledovaniya i eksperimental'nye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy"* [Proceedings of the Congress with International Participation and Elements of School of Young Scientists "Fundamental Research and Experimental Development of Processing and Recycling of Technogenic Formations"]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 544–548. (in Russ.)

17. Shiryayeva E.V., Podgorodetskiy G.S., Malysheva T.Y., Gorbunov V.B., Zavodyanyi A.V., Shapovalov A.N. Effects of Adding Low-Alkali Red Mud to the Sintering Batch at OAO Ural'skaya Stal'. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, no. 1, pp. 6–10. DOI: 10.3103/S0967091214010173

18. Shiryayeva E.V., Podgorodetskiy G.S., Malysheva T.Y., Gorbunov V.B., Detkova T.V. Influence of Low-Alkali Red Mud on the Composition and Structure of Sintering Batch Consisting of Heterogeneous Iron-Ore Concentrates. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, no. 9, pp. 625–628. DOI: 10.3103/S0967091214090150

Received 3 October 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Рошин, В.Е. Твердофазное предвосстановление железа – основа безотходных технологий переработки комплексных руд и техногенных отходов / В.Е. Рошин, С.П. Салихов, А.Д. Поволоцкий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 78–86. DOI: 10.14529/met160408

FOR CITATION

Roshchin V.E., Salikhov S.P., Povolotskiy A.D. Solid-Phase Pre-Reduction of Iron as a Basis of Non-Waste Technologies of Processing Complex Ores and Industrial Waste. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 78–86. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160408