Краткие сообщения

УДК 669.181.24

ВЫДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА ИЗ МОНОМЕТАЛЬНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ РУД

С.П. Салихов, С.А. Брындин

ISOLATION OF METAL DURING SOLID-PHASE REDUCTION OF IRON IN MONOMETALLIC AND COMPLEX ORES

S.P. Salikhov, S.A. Bryndin

Представлены результаты экспериментов по твердофазному восстановлению железа из монометальной (сидерит Бакальского месторождения) и комплексной (титаномагнетит Суроямского месторождения) руд.

Пустая порода в суроямской руде не принимает участие в качестве переносчика анионов кислорода при восстановлении. Образовавшаяся на поверхности образцов титаномагнетитовой руды металлическая пленка препятствовала дальнейшему восстановлению железа. Равномерное распределение пустой породы в сидерите не препятствует процессу восстановления.

Ключевые слова: восстановление железа из руд, твердофазное восстановление, сидерит, титаномагнетит.

The results of experiments of solid-phase reduction of iron monometallic (siderite of Bakal deposit) and complex (titanomagnetite of Suroyam deposit) ores are presented.

The waste rock of Suroyam ore deposit is not involved in a reduction process as a carrier of oxygen anions. Metal film formed on the surface of titanomagnetite ore samples prevents further reduction of iron. Even distribution of waste rock in siderite ore does not prevent reduction process.

Keywords: reduction of iron ore, solid-phase reduction, siderite, titanomagnetite.

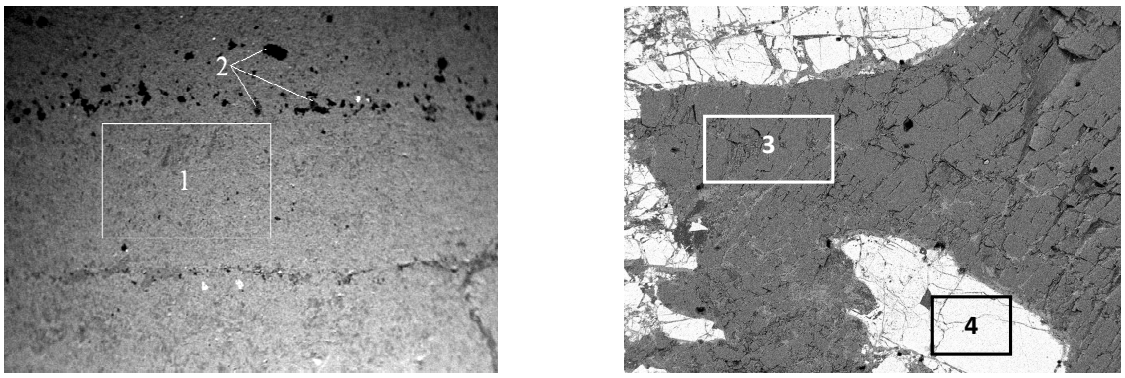
Руды Суроямского и Бакальского месторождений невозможно перерабатывать по классической двухстадийной технологии. Пустая порода этих руд содержит тугоплавкие оксиды, которые повышают температуру плавления доменных шлаков. В то же время запасы этих руд могут обеспечить металлургический комплекс Урала качественным первородным шихтовым материалом для производства высококачественного металла на многие годы. Первородный шихтовый материал из этих руд целесообразно производить технологиями прямого восстановления железа. Для уточнения параметров восстановления необходимо изучить особенности процесса восстановления железа из этих руд.

В работе изучали поведение монометальной (сидеритовой) и комплексной (титаномагнетитовой) руд при непрерывном нагреве в печи Таммана со скоростью 20 °С в минуту и изотермической выдержке при достижении температуры эксперимента. Образцы представляли собой кусочки руд размерами 5–10 мм. В качестве углеродистого восстановителя использовали порошок графита – отходы механической обработки электродов. Куски руды помещали в графитовый тигель и засыпали порошком графита, обеспечивая контакт всей поверхности образцов с восстановителем.

Восстановленные образцы разрезали поперек, из них подготавливали шлифы, которые изучали на оптическом микроскопе. Состав фаз определяли микрорентгеноспектральным методом на электронном микроскопе JSM-6460LV (JEOL), а фазовый состав – с помощью дифрактометра ДРОН-4.

Руда Бакальского месторождения представляет собой осадочную горную породу, образованную слоями сидероплезита ($Fe_{0,74}$, $Mg_{0,24}$, $Mn_{0,02}$)CO_3 с вкраплениями зерен кварцита. Руда Суроямского месторождения образована в основном оксидами железа с небольшим содержанием оксидов титана, марганца. Пустая порода суроямских титаномагнетитов представлена преимущественно оксидами магния, кремния и кальция (рис. 1).

В необожженном сидерите содержание железа составляет 30–35 %, но после разложения кар-



а) б)

Рис. 1. Составляющие бакальского сидерита (а); ×30 и суроямского титаномагнетита (б), ×50: 1 – сидероплезит; 2 – зерна кварцита; 3 – пустая порода; 4 – рудное зерно

бонатов его содержание повышается до 45–50 % [1]. Содержание железа в титаномагнетитовой руде по всему месторождению составляет 18–22 %, однако в рудном зерне содержание железа может достигать 66–68 %. Тем самым, рудные зерна титаномагнетита являются частицами с высоким содержанием железа.

Восстановление железа в сидерите

После нагрева образцов сидерита до 1200 °С и изотермической выдержке 1 час восстановление произошло не полностью (рис. 2). Видны слой восстановленного металла и невосстановленная руда в центральной части. Состав невосстановленной части соответствует $(MgO)_{0,432}(FeO)_{0,568}$ [2]. Нагрев образцов сидерита до 1300 °С и изотермическая выдержка в течение 1 часа привели к полному восстановлению железа (рис. 2, б), что подтверждается результатами рентгенофазового анализа. Железная «губка» в образце разделена сеткой пустой породы, состоящей в основном из оксида магния и частично из оксидов недовосстановленного железа и марганца.

Таким образом, повышение температуры от 1200 до 1300 °С увеличивает скорость и степень восстановления железа в куске сидерита.

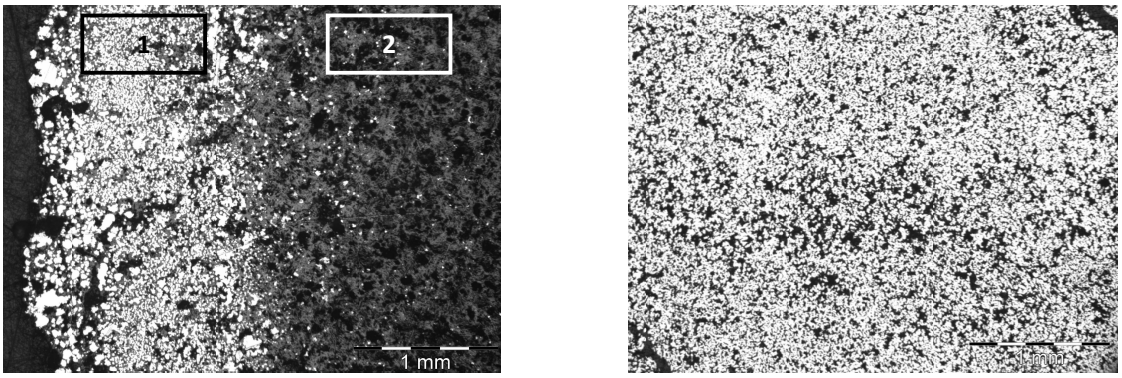
Дальнейшее увеличение температуры приводит к плавлению восстановившегося железа у поверхности образца. Плавление железа при температуре ниже 1540 °С обусловлено его науглероживанием. Этот металл по трещинам и сквозь сетку пустой породы выталкивается на поверхность, образуя на ней капли сферической формы (рис. 3). В результате этого в предповерхностных слоях образцов содержится меньше выделений железа, чем в центре кусков.

Восстановление железа в титаномагнетите

Пустая порода титаномагнетитов плавится при более низкой температуре, чем пустая порода сидерита. Поэтому эксперименты проводили при температуре не более 1200 °С.

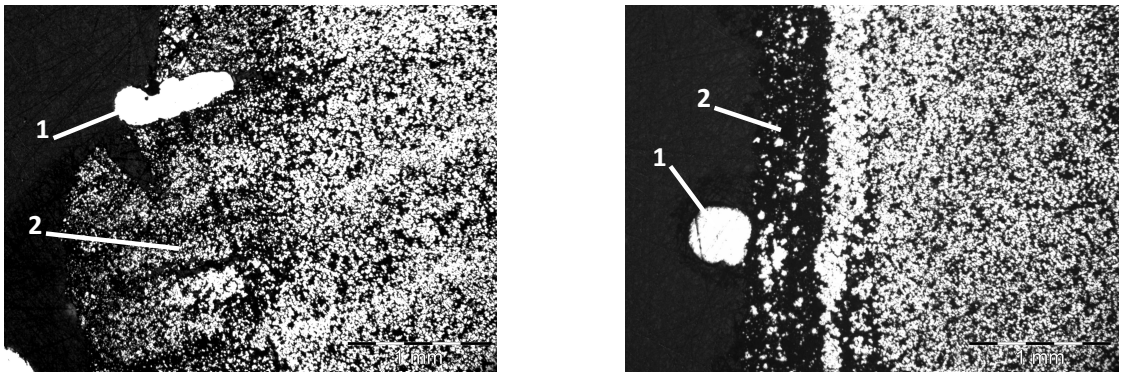
На рис. 4, а у поверхности образца выявлено 3 слоя: слой металла, слой недовосстановившехся оксидов железа и слой исходной руды. Полное восстановление проходило на глубину нескольких миллиметров, однако восстановление до оксидов двухвалентного железа происходило на большую глубину. На рис. 4, б выявлены только слой металла и слой низших оксидов железа.

В этих экспериментах на глубину выделения $Fe_{мет}$ не оказывали существенного влияния ни



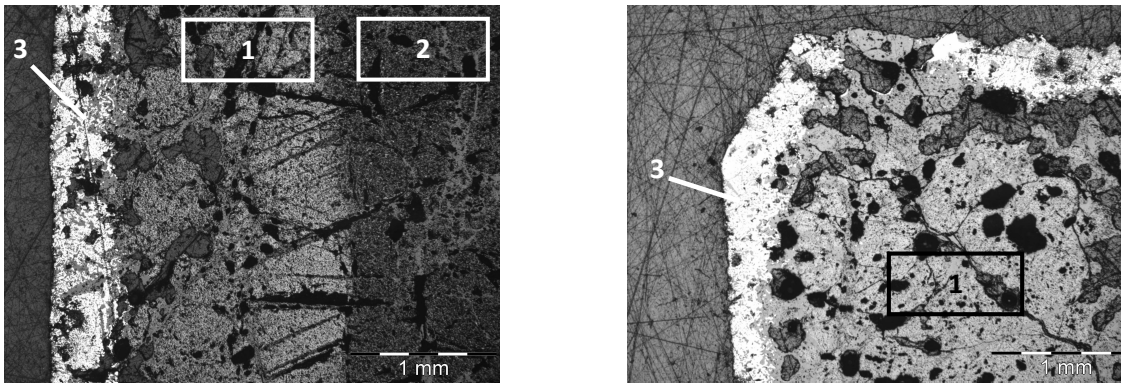
а) б)

Рис. 2. Результат металлизации кускового сидерита после твердофазного восстановления при температуре 1200 °С (а) и 1300 °С (б) и выдержке 1 час: 1 – слой восстановленного железа; 2 – слой недевосстановленной руды, ×50



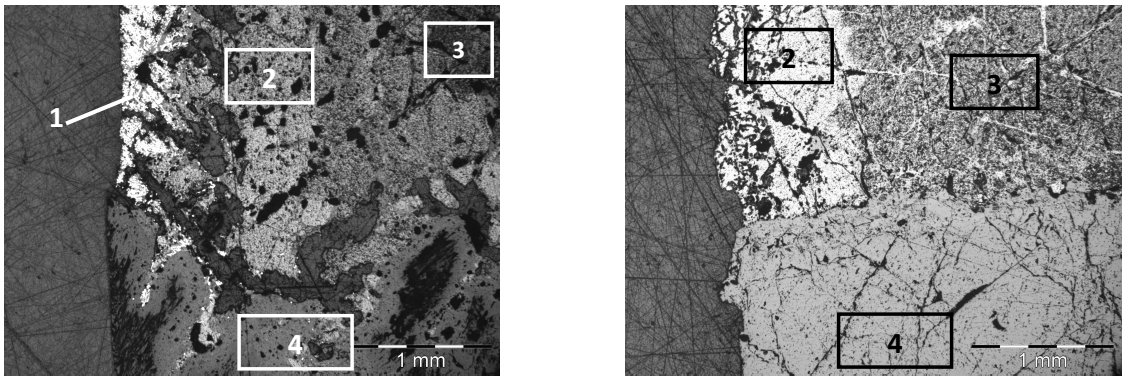
а) б)

Рис. 3. Выделение капель металла после твердофазного восстановления при температуре 1350 °С и выдержке 1 час: 1 – капля металла; 2 – «обедненный слой образца», ×50



а) б)

Рис. 4. Результат металлизации кускового титаномагнетита после твердофазного восстановления при температуре 1200 °С без выдержки (а) и при температуре 1150 °С и выдержке 1 час (б): 1 – слой вюстита; 2 – слой невосстановленной руды; 3 – слой восстановленного металла, ×50



а) б)

Рис. 5. Развитие процесса восстановления в образцах кусков титаномагнетита после твердофазного восстановления при температуре 1200 °С без выдержки (а) и при температуре 1100 °С и выдержке 10 минут (б) на границе с пустой породой: 1 – восстановленный металл; 2 – вюстит; 3 – невосстановленная руда; 4 – пустая порода, ×50

температура, ни время выдержки, в то же время с увеличением времени выдержки увеличилась глубина восстановления до оксидов двухвалентного железа.

В ряде работ [3, 4] отмечается положительное влияние пустой породы на скорость и глубину восстановления. Однако в суроямских титаномагнетитах такой закономерности не обнаруживается (рис. 5). Слой восстановленного железа (рис. 5, а) и слой вюстита (рис. 5, б) четко прерываются слоем пустой породы и не видно результатов распространения восстановительного процесса вглубь куска по этой фазе.

Сравнивая полученные результаты, можно сделать выводы о разном протекании процесса восстановления в сидеритовой (монометальной) и

в титаномагнетитовой (комплексной) рудах, что может быть связано с составом пустой породы. Пустая порода в суроямской руде не принимает участие в качестве переносчика анионов кислорода при восстановлении. Образовавшаяся на поверхности образцов титаномагнетитовой руды металлическая пленка препятствовала дальнейшему восстановлению железа, а равномерное распределение пустой породы в сидерите не препятствует процессу восстановления.

Литература

1. Леонтьев, Л.И. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин. – М.: Металлургия, 1997. – 432 с.

2. Салихов С.П. Термическое разложение и твердофазная металлизация бакальских сидеритов / С.П. Салихов, А.В. Рощин, В.Е. Рощин, В.А. Лазуков // Современные проблемы элетрометаллургии стали: материалы XIV Междунар. конф. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2010. – Ч. 1. – С. 122–127.

3. Роль силикатной фазы вмещающей породы в процессе металлизации вкрапленных хромовых руд / А.В. Рощин, В.Е. Рощин, А.Г. Рябухин, Ю.Н. Гойхенберг // Металлы. – 2007. – № 4. – С. 3–10.

4. Рощин, А.В. Физические аспекты твердофазного восстановления металлов / А.В. Рощин, В.Е. Рощин // Электрометаллургия. – 2009. – № 1. – С. 13–22.

Поступила в редакцию 6 сентября 2012 г.