

**С.Э. КИРНОСОВ**

(Украина, Кривой Рог, Криворожский технический университет)

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ КРИЦЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ ПРЯМОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ТРУДНООБОГАТИМЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами*

Удорожание сырьевых и энергетических ресурсов в металлургической отрасли, а также транспортных услуг вызывают повышенный интерес к пирометаллургическому способу подготовки к обогащению труднообогащаемого железосодержащего сырья [1]. В настоящее время конкурирующими способами подготовки к обогащению железных руд являются магнитизирующий обжиг руды и кричный процесс. Кричный процесс заключается в отделении от пустой породы полезных компонентов в виде металлических зерен (крицы), удобных для дальнейшей металлургической переработки.

При сопоставлении технологических показателей полученных с применением кричного процесса и магнетизирующего обжига с магнитным обогащением, кричный процесс оказывается более предпочтительным, обеспечивающим значительно лучшее качество концентрата и более высокое извлечение в него железа [4].

Крица является сырьевым продуктом для производства высококачественных сталей специального назначения и заменяет металлолом в металлургическом процессе. Крица, используемая непосредственно в сталеплавильных агрегатах, не должна содержать более 0,15% серы и 6% шлака и иметь слишком крупные размеры частиц.

Кричный передел позволяет организовать простое маломасштабное компактное производство без агломерационных машин, доменных и коксохимических печей, не требующее больших капитальных вложений и подающееся автоматизации.

При опытном производстве крицы на Орско-Халиловском металлургическом комбинате (ОХМК) отработан такой процесс переработки сравнительно бедных бурых железняков [6]. После восстановления руды до крицы охлажденный полупродукт направляется в отделение магнитной сепарации, где измельчается на реверсивных мельницах и подвергается сухой магнитной сепарации в одну стадию на двухбарабанных магнитных сепараторах. Кричный концентрат полностью используется в доменном цехе. Автором отмечается, что в результате недостаточного эффективной магнитной сепарации и плохо организованного отсева качество концентрата получается неудовлетворительным. За счет мелких фракций, загрязненных шлаком, содержание неметаллических включений достигает 25%, а иногда и больше. Ввиду большой загрязненности неметаллическими включениями крица используется только в шихте доменных печей. Магнитное обогащение на современном уровне развития позволяет обеспечить содержание шлака в обогащенной крице не более 6%.

**Збагачення корисних копалин, 2010. – Вип. 43(84)**

## **Магнітна і електрична сепарація**

При хорошо организованном магнитном и гравитационном обогащении можно получить кричные концентраты с содержанием 90...95% железа, которые можно использовать в сталеплавильном производстве.

Одним из резервов железорудной базы черной металлургии являются гетитосодержащие руды, или иначе называемые "бурые железняки". Добыча и переработка этих руд в настоящее время ведется еще в недостаточном объеме, хотя запасы их как в мировом масштабе, так и в Украине значительные. Так, только в Приазовском железорудном бассейне в Украине разведанные запасы их около 6 млрд.т. Значительное количество подобных руд имеется в Европе, Англии, Америке, Африке, Индонезии и других странах. Гетитосодержащие руды характеризуются сравнительно невысоким содержанием железа (до 50%). Нередко они содержат вредные компоненты (мышьяк, фосфор) и значительное количество шлакообразующих примесей, вследствие чего преобладающая часть их требует обогащения. Однако, сравнительно неглубокое залегание и выдержанность на большом протяжении пластовых залежей большинства месторождений позволяют разрабатывать их открытым способом, а низкая прочность – без применения взрывных работ. Громадные запасы руд, обеспечивающие многолетнюю эксплуатацию, создают предпосылки для успешного освоения их промышленностью. Основной проблемой в освоении этих руд является их экономически выгодная подготовка к использованию в металлургии.

### *Анализ исследований и публикаций*

В Украине и других странах проводились работы [2, 3, 5, 7, 8] по разработке методов переработки труднообогатимых руд, такие как обогащение промывкой, гравитационным обогащением, флотацией, магнитной сепарацией в сильном магнитном поле, обжигмагнитное обогащение. Получение удовлетворительных результатов механическими методами обогащения этих руд оказалось затруднительным из-за сложного строения и особенностях физических свойств минералов [5]. Наилучшие технологические результаты давало применение прямого восстановления руд – кричного процесса.

Примером практически освоенного такого процесса является, разработанный американскими и японскими фирмами, ITmak3 процесс. Основной недостаток кричного процесса – высокая себестоимость конечных продуктов кричного передела вызвана применением в нем газа, кокса и высокосортных углей, а также попыткой получения крупнозернистой крицы путем повышения температуры и увеличения времени крицеобразования. Получение тонкодисперсной крицы ("полукрицы") позволит снизить расход тепла и значительно сократить время крицеобразования. Идею использования "полукрицы" высказал в свое время профессор В.И. Кармазин [8]. Восстановление руды до полукрицы сокращает время обжига и уменьшает загрязнение металла вредными примесями, такими как мышьяк, сера, фосфор и др. Обработка бедных руд "полукричным" процессом с использованием в качестве восстановителя и источника тепла бурых углей, позволяет достаточно эффективно извлекать мелкие зерна крицы магнитными сепараторами. Технология несколько усложняется тем, что метал-

лические концентраты губчатого железа крицы после их извлечения магнитной сепарацией необходимо подвергать брикетированию для использования брикетов в сталеплавильном производстве.

### *Постановка задачи*

Прогресс в технике магнитного обогащения руд позволяет, в настоящее время, с достаточно высокой эффективностью извлекать мелкие частицы магнитных минералов (зерна 0,05-0,01 мм). На практике, при использовании для обогащения измельченной крицы магнитной сепарации возникали определенные проблемы, как оказалось вызванные недостаточной изученностью закономерности сепарации продуктов, содержащих металлическое железо [8]. Изучению особенностей этого процесса и посвящена настоящая работа.

Результаты сепарации измельченной после восстановительного обжига крицы зависят от состава и формы ее составляющих – губчатого железа и вещества, заполняющего поры (шлака, минералов), которые, в свою очередь, определяются условиями восстановления руды. Формирование распределения продукта восстановления гетитовой руды по отдельным магнитным фракциям сказывается на физических свойствах компонентов крицы и их поведении в магнитном поле в процессе сепарации. Наибольший интерес представляют магнитная восприимчивость и проницаемость металлической и шлаковой части крицы, а также влияние этих свойств на технологические показатели магнитного обогащения крицы.

### *Изложение материала и результаты исследований*

В настоящей работе изучались особенности магнитной сепарации крицы полученной при восстановлении преимущественно гетитовой руды. Исследования проводились на пробе вскрышных пород месторождения никеля, которые включают железосодержащие охристые минералы (в основном гетит), кварц, глинистые минералы и некоторые другие. Руда, помимо гетита, содержит гидроокислы железа – гидрогетит. В качестве восстановителя применялся бурый уголь.

В результате высокотемпературного восстановления окислов образуется крица, состоящая из губчатого железа, поры которого заполнены шлаком и тугоплавкими минералами.

### *Технологические показатели магнитного обогащения крицы*

Расчет сепарационных характеристик по данным фракционного анализа.

При магнитной сепарации извлечение в магнитную фракцию металла зависит от определенных свойств разделяемых сред. К таким свойствам относятся: магнитная восприимчивость, магнитная жесткость и масса частиц измельченных сред подвергающихся сепарации. Процесс сепарации происходит в аппаратах (в нашем случае магнитных сепараторах) составленных по определенной схеме. Разделительную способность аппарата или схемы, эффективность извлечения металла, можно характеризовать при помощи разделительных чисел или сепарационной характеристикой [9, 10]. Если известны разделительные числа для данного материала и аппарата, то можно прогнозировать технологические

## Магнітна і електрична сепарація

показатели при сепарации в тех же условиях для аналогичного материала, в состав которого входят такие же вещества, но в другом количестве.

Основой для расчета ожидаемых технологических показателей могут быть данные структурных и минералогических исследований материала крицы. Обычно в магнитный сепаратор поступает смесь, содержащая взаимно диспергированные частицы металла и шлака.

Магнитная проницаемость крицы зависит от концентрации металла и величины магнитного поля и моделируется функцией Бруггемана-Ландауэра (рис. 1):

$$\mu = \frac{1}{4} \left\{ (3\varphi - 1)\mu_i + (2 - 3\varphi)\mu_e + \sqrt{[(3\varphi - 1)\mu_i + (2 - 3\varphi)\mu_e]^2 + 8\mu_e\mu_i} \right\}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – объемная плотность дисперсной фазы;  $\mu_i$  и  $\mu_e$  – проницаемости дисперсной и дисперсионной фаз соответственно.

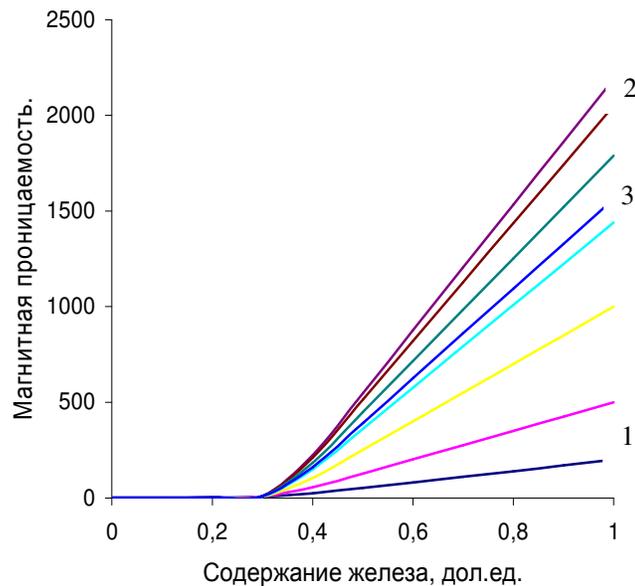


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости крицы от содержания металла при разных значениях напряженности магнитного поля:  
1 – 20 кА/м; 2 – 266 кА/м; 3 – 400 кА/м

При сепарации этой смеси можно выделить следующие категории, отличающиеся содержанием железа и магнитными свойствами:

Металл – корольки металла со следами шлака или стекла, с редкими включениями шлака и пор – содержит до 80% железа.

Богатая фракция – металл с дисперсным шлаком, фракции губчатого железа с вкраплениями шлака и содержанием железа до 70%.

Средняя фракция – шлак с дисперсным металлом, фракции слабомагнитные также с тонко вкрапленным металлом и содержанием железа около 54%.

Бедная фракция – шлак со следами металла – немагнитные фракции порис-

## Магнітна і електрична сепарація

того шлака или стекла со следами тонко вкрапленного металлического железа. Содержание железа здесь составляет порядка 9%.

На практике вышеназванные категории выделяются сепарацией в те или иные технологические продукты. Состав и качество продуктов зависят от характеристик внешнего магнитного поля и от физических характеристик продуктов.

Как отмечалось выше, при магнитной сепарации крицы следует учитывать зависимость магнитной проницаемости компонентов крицы от напряженности магнитного поля.

На рис. 2. приведены технологические показатели сепарации крицы полученные при разных значениях силы магнитного поля сепаратора, которые моделируются известным выражением для разделительных чисел [9] при диффузионном массопереносе [10]:

$$E = 1 - \exp\left\{-\frac{v^2 t_p}{D_i [1 - \exp(-v y_0 D_i^{-1})]}\right\}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость сепарационного массопереноса;  $D_i = 0,0112ur$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $r$  – радиус кривизны рабочей зоны;  $y_0$  – высота рабочей зоны сепаратора.

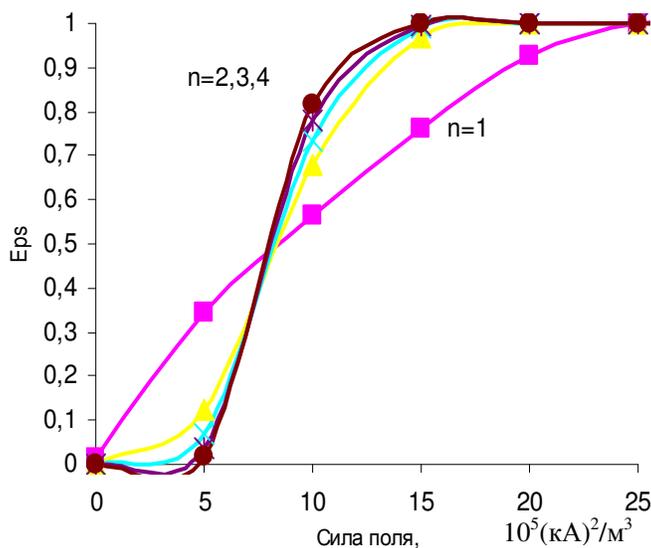


Рис. 2. Сепарационная характеристика – зависимость извлечения ( $E_{ps}$ ) от силы поля и числа стадий сепарации  $n$

Из вышеприведенного следует, что магнитную сепарацию крицы следует проводить в специальных сепараторах с пониженной напряженностью и высоким градиентом магнитного поля в рабочей зоне. Это может быть барабанный сепаратор с барабаном армированным просечной сеткой из ферромагнитного материала. В качестве таких аппаратов могут быть использованы высокоградиентные сепараторы, работающие в режиме с низкой индукцией поля.

## **Магнітна і електрична сепарація**

### *Выводы*

1. Исследование вещественного состава гетитовой руды и продуктов ее обогащения показало, что получение высокосортного концентрата и снижение потерь железа с отходами возможно только с применением процесса прямого восстановления железных минералов руды до металлического железа.

2. Образующаяся при восстановлении двухфазная неоднородная среда представляет собой сложную случайно-неоднородную систему, зависимость от условий восстановления.

3. Магнитная проницаемость продукта зависит от содержания металла в нем и от степени его дисперсности, а также от величины внешнего магнитного поля.

4. Существует прямая связь между условиями восстановления руды и магнитными свойствами металлизированного продукта. Результаты восстановления определяют показатели дальнейшего магнитного обогащения кричного продукта. Технологические показатели магнитной сепарации измельченной крицы улучшаются при снижении напряженности и повышении неоднородности магнитного поля сепаратора.

### **Список литературы**

1. **Панычев А.А.** Перспектива развития кричного производства // Обогащение руд. – 2003. – №1. – С. 44-48.
2. Применение кричного процесса при обработке Керченского месторождения / **В.И. Кармазин, Н.С. Довжик, Н.А. Малецкий и др.** // Обогащение руд. – 1964. – №4. – С. 27-29.
3. **Белаш Ф.Н., Кирносов Э.Г.** К вопросу обогащения керченских руд с получением концентратов, содержащих металлическое железо // Криворожский горнорудный институт: Сб. науч. тр. – Вып. XI. – С. 365-369.
4. **Панычев А.А.** Эффективность кричного метода обогащения труднообогатимого железосодержащего сырья // Обогащение руд. – 2004. – №1. – С. 43-44.
5. **Кучер А.М., Иванов А.И.** Взаимосвязь термодинамических и кинетических характеристик процесса восстановления с показателями обогащения обожженных кварцитов // Обогащение руд черных металлов: Тематический сб. – М.: Недра, 1980. – Вып. 9. – С. 30-41.
6. **Панычев А.А.** Опытное-промышленное обогащение природно-легированного сырья кричномагнитным способом // Обогащение руд. – 2003. – №6. – С. 26-30.
7. **Губин Г.В., Кучер А.М., Невойса Г.Г.** Термические методы обработки керченских руд для магнитного обогащения // Изв. АН СССР, ОТН: Metallургия и топливо. – 1961. – №2. – С. 3-12.
8. Обогащение бурых железняков / **Баришполец Б.Т., П.А. Тащиенко, Г.Г. Невойса и др.** – М.: Недра, 1965. – 202 с.
9. **Кармазин В.И., Кармазин В.В.** Магнитные методы обогащения. – М.: Недра, 1984. – 416 с.
10. **Тихонов О.Н.** Введение в динамику массопереноса процессов обогатительной технологии. – Л.: Недра, 1973. – 240 с.

© Кирносов С.Э., 2010

*Надійшла до редколегії 12.09.2010 р.*

*Рекомендовано до публікації к.т.н. В.В. Гаєвим*

**Збагачення корисних копалин, 2010. – Вип. 43(84)**