

УДК 622.778

**П.А. Сыса, В.В. Кармазин**

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАГNETИТОВЫХ  
КОНЦЕНТРАТОВ ЗА СЧЕТ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ  
СЕПАРАЦИИ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГNETИТНЫХ ПОЛЯХ  
С НИЗКОЙ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ**

*Рассмотрен новый метод обогащения магнетитовых кварцитов – высокоградиентной сепарации в слабом магнитном поле.*

*Ключевые слова: магнетитовые концентраты, высокоградиентная сепарация, бездоменная металлургия.*

---

Экологическая безопасность, высокая производительность и низкая стоимость магнитной сепарации ставит ее вне конкуренции с другими методами. По этой причине возрастают количественно и качественно (за счет новых объектов) не только масштабы ее применения, но и сам «ассортимент» размерных рядов сепараторов с широкими технологическими возможностями.

Сегодня мы можем говорить о следующих вариантах технологического применения магнитной сепарации для сильномагнитных материалов:

– магнитная рудоразборка магнетитовых руд в карьерах железорудных ГОКов (крупность кусков сепарируемой руды до 0,5 м) [2];

– сухая магнитная сепарация мелкодробленной железной руды перед измельчением на обогатительной фабрике (ОФ) [3];

– магнитная сепарация рудной галли после самоизмельчения для удаления пустой породы в питании рудно-галечных мельниц;

– магнитное улавливание железного металлолома (скрапа) их исходных продуктов перед их переработкой;

– противоточная мокрая магнитная сепарация сливов классификаторов первой стадии измельчения для выделения основной части отвальных хвостов;

– постадийная полупротивоточная и прямоточная мокрая магнитная сепарация для доводки концентрата;

– магнитно-гидравлическая сепарация (промывка пульпы, взвешенной в слабом магнитном поле в восходящих потоках воды);

– магнитная дешламация (сгущение обводненной пульпы после ее предварительного намагничивания постоянными магнитами);

– магнитная фильтрация (наложение постоянного магнитного поля на слой магнетита перпендикулярно фильтрующей поверхности резко повышает производительность фильтра и снижает его влажность);

– вспомогательные процессы (намагничивание и размагничивание материалов).

В природе пока нет других методов разделения минералов, в которых извлекающая сила, действующие на частицы одного из разделяемых минералов может в сто и более раз превышать силы, действующие на части-

цы других минералов, что обеспечивает магнитной сепарации большие технико-экономические преимущества (производительность в сотни т/час на метр ширины питания и т. п.). К сожалению, это главное преимущество магнитных методов оборачивается и их основным недостатком – низкой селективностью разделения минералов из-за явления магнитной флокуляции, вызванного магнитным взаимодействием сильномагнитных частиц между собой.

В России магнитная сепарация неизменно остается технологической основой переработки руд черных металлов. Только в месторождении Курской магнитной аномалии (КМА) сосредоточены самые крупные в мире запасы железистых кварцитов (около 3 трлн т) и магнетитовых руд – свыше 22 млрд т. Здесь работают четыре горно-обогатительных комбината: Лебединский, Стойленский, Михайловский и Белгородский, Яковлевский рудник, и объединение КМАруда, которые производят более 30 млн т/год концентратов с качеством от 65 % (МГОК) до 69 % (ЛГОК).

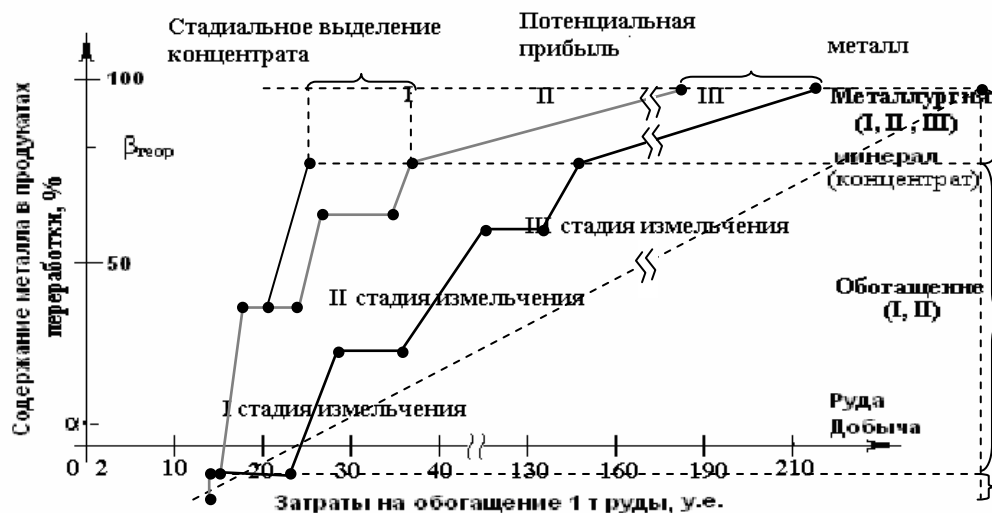
В производстве стали доменный передел становится основным тормозом, потому, что растут требования к качеству стали, а основное количество серы и фосфора попадает в чугун при доменном переделе и ухудшает качество стали; кокс и коксующиеся угли все более труднодоступны, при этом есть огромные запасы природного газа и относительно дешевая электроэнергия.

В связи с этим, в настоящее время быстрыми темпами развивается бездоменная металлургия. Основным требованием, предъявляемым к железорудному сырью при бездоменных процессах переработки, является общее содержание Feобщ не менее 67 %, при содержании кислых оксидов

менее 2 % ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) и основных оксидов менее 3 % ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) для поддержания оптимального кремниевого модуля. С другой стороны, обогатимость магнетитовых кварцитов ухудшается с увеличением глубины карьеров, поэтому и качество железорудного сырья для металлургии постоянно снижается.

На рис. 1 показан принципиальный график зависимости содержания металла в руде и продуктах её передела от произведенных на этот передел затрат. Основные затраты носят энергетический характер и направлены на разрушение межмолекулярных связей в рудах для механического отделения частиц полезного минерала от минералов пустой породы. В предельном, идеальном случае, когда разрушение происходит по поверхности срастания этих минералов (раскрытие 100 %) и энергозатраты минимальны (кривая I). С другой стороны – предельный случай с максимальными затратами был известен ещё древним металлургам (кривая III). Они плавляли исходную руду в восстановительной среде – углеродное топливо, разрушая все межмолекулярные связи в кристаллической решетке, а затем отделяли металл от шлака по плотности силой тяжести, однако руды в те времена были куда более богатыми и объёмы производства незначительными.

Участки затрат, на которых содержание металла возрастает – это процессы сепарации или отделения свободных частиц полезного минерала от частиц минералов различными методами обогащения. Все известные процессы сепарации минералов также отличаются друг от друга по стоимости и эффективности разделения минералов, причем последняя зависит от контрастности свойств разделяемых минералов, ко-



**Рис. 1. Зависимость содержания металла в продуктах передела от затрат на обогащение 1 тонны руды:** I и II – идеальный и реальный варианты обогащения руды с последующей металлургической переработкой концентрата, III – прямая плавка руды в доменной печи

торые собственно и используются при их сепарации.

Все эти кривые на рис. 1, включая и реальные (III), так или иначе, отражают ход технологического процесса получения полезного минерала холодными методами (минераллургия), а затем и металла – пирометаллургией, но с различной степенью технологического совершенства, т.е. с различным уровнем затрат. Участки прямых затрат без повышения содержания металла в продукте – это процессы раскрытия минералов (дробление, измельчение или классификация продуктов по крупности). Как видно из рис. 1, стадийное выделение конечных продуктов и получение сырья для бездомной металлургии является мощным резервом современной технологии обогащения руд железа.

Наиболее важной проблемой технологии будущего является выбор типа измельчения, определяющего раскрытие минералов и всю технологию

дальнейшего обогащения. Самым простым и надежным решением является шаровое измельчение, имеющее почти трехсотлетнюю историю своей оптимизации. Оно гарантирует существенные преимущества в удельной производительности, но за это приходится расплачиваться снижением селективности раскрытия минералов и снижением качества конечных концентратов. Размерный ряд шаровых мельниц практически достиг своего максимума, обеспеченного прочностью используемых конструктивных материалов.

На более высоком технологическом уровне находится самоизмельчение. Именно благодаря ему и существует огромный резерв по повышению качества конечного концентрата и в конечном счете снижению себестоимости его производства. Как известно, Лебединский и Стойленский ГОКи работают на рудах практически одного месторождения и даже одного

карьера, но первый работает по схеме полного самоизмельчения, а второй – применяет шаровое измельчение. Показатели их работы не сопоставимы: первый – единственный в России ГОК, получающий суперконцентраты для бездоменной металлургии (свыше 70 % Feобщ), а второй – только товарные концентраты и окатыши для доменного передела, содержащие не выше 66% Feобщ. Тем не менее, даже на ЛГОКе на первых фабриках, где работают мельницы самоизмельчения диаметром 7 м не удается получать концентраты свыше 68 % Feобщ, однако на третьей фабрике, где на первой стадии измельчение осуществляется в двух мельницах мокрого самоизмельчения ММС 90х30А, производства ОАО «Тяжмаш» г. Сызрань, после доводки получают только суперконцентраты. В сливе этих мельниц содержится до 70 % зерен свободного магнетита. Низкая селективность раскрытия при шаровом помоле связана с тем, что благодаря многократному превосходству физико-механических свойств стали шаров по сравнению с железистыми кварцитами разрушение последних идет в направлении удара, и зона контакта разделяемых минералов «магнетит-кварц» остается в виде сростков. П. Е. Остапенко считал, что количество необогащаемого класса, т. е. класса который распределяется пополам между концентратом и хвостами определяется произведением площади срастания минералов на средний размер зерна в последней стадии измельчения [4]. Такие сростки имеют особую прочность как железобетон, но роль железа играет относительно вязкий магнетит, а камня – хрупкий кварц. Самоизмельчение разрушает и такие сростки, поскольку физико-механические свойства разрушающего и разрушаемого материалов одинаково-

вы (это один и тот же материал), чего нельзя сказать о материалах шара и руды.

Мокрая магнитная сепарация измельченных магнетитовых кварцитов на серийных мокрых барабанных магнитных сепараторов с постоянными магнитами типа ПБМ-120/300 выделяет из-за низкой селективности в конечный продукт (хвосты) только немагнитные зерна пустой породы. Вся рудная смесь (зерна магнетита, богатые и бедные сростки, коэффициент контрастности свойств между которыми значительно ниже, чем каждого из них с кварцем) при этом переходит в магнитный продукт (концентрат), в который к тому же захватываются и немагнитные зерна пустой породы за счет магнитной флокуляции сильномагнитных зерен и физико-механической адгезии.

Многочисленные попытки исследователей создать высокоселективные конструкции мокрых магнитных сепараторов были иногда положительными в технологическом плане, но экономически несостоятельными, либо неработоспособными или не доведенными до внедрения в промышленных условиях [1, 4, 5, 6]. В НТЦ МГГУ с 1995 г. проводятся экспериментально-конструкторские и технологические исследования в промышленных условиях по созданию высокоселективных магнитных сепараторов высокой частотой вращения магнитного поля способных реализовать постадийное получение товарных концентратов по мере раскрытия магнетита и получение сырья для бездоменной металлургии. На основе этих испытаний был выполнен проект, запатентованный НТЦ МГГУ и ОАО МГОК, нового опытно-промышленного высокоселективного сепаратора ВСПБМ-90/100, защищенного патентом РФ №236421, который из-

готовлен Воронежским заводом «Рудгормаш» и успешно испытан на ЛГОКе и МГОКе. Прирост качества магнитного продукта после первой стадии измельчения на ЛГОКе составил 17 % (до 68 %), а на МГОКе на 11% (до 65 %). При доводке на ВСПБМ-90/100 товарного концентрата на ЛГОКе качество концентрата легко повысить до 70 % при извлечении около 80 %, а на МГОКе только до 67 % при извлечении около 30 %. Применение для этой цели обратной флотации в колонных флотомашинах оказалось малоэффективным из-за проблем подъема тяжелых сростков в пенный продукт.

На ЛГОКе из такого товарного концентрата на IV ОФ производят также сырье для технологий бездоменной металлургии (порошковая металлургия, электросталеварение или горячее брикетирование железа), применяя дополнительное доизмельчение, магнитную сепарацию и дешламацию.

С этой же целью предлагаемую для ГОКа будущего технологию, даже без доизмельчения, можно дополнить магнитогравитационной (в «бочках Зеленова»), которые успешно работают на Оленегорском ГОКе или флотационной технологией доводки концентрата для снижения содержания кремнезема до уровня менее 2%, а также и серы до уровня ниже 0,06% за счет механохимической активации его озоном (по патенту НТЦ МГГУ). При этом комбинат может перейти на технологию горячего брикетирования железа по опыту ЛГОКа, повысив при этом более чем на порядок стоимость своей продукции.

Все это может показаться странным, но все описанные выше и уже реализованные инновации (самоизмельчение, стадийное выделение концентратов, обратная флотация, прямое восстановление, металлизи-

рованные брикеты с их фотографиями и др.) были подробно описаны в пророческой монографии «Новые направления глубокого обогащения тонковкрапленных железных руд», подготовленной учеными школы И.Н. Плаксина и В.И. Кармазина еще в 1964 г. [5], когда их промышленная проверка даже не начиналась.

Одним из путей повышения качества концентратов является создание новых высокоселективных сепараторов, позволяющих отделять чистые зерна минералов от сростков и зерен пустой породы. Вариантом решения поставленной задачи является применение для этой цели высокоградиентной магнитной сепарации в слабом поле, что успешно испытано А.М. Туркеничем на рудах Ингулецкого и Полтавского ГОКов [2].

При применении слабого магнитного поля с напряженностью до 300 э (уровень максимальной магнитной восприимчивости магнетита) и высокоградиентной осадительной системы в рабочей зоне флокулируют только магнетитовые зерна, а для полной флокуляции не хватает напряженности магнитного поля, и сростки остаются в относительно свободном взвешенном состоянии.

Однако в точках высоких градиентов осадительных полюсов (рис. 2)



**Рис. 2. Распределение напряженности магнитного поля в полиградиентной матрице**

создается магнитная сила, достаточная для удержания частиц магнетита. Учитывая то, что размеры проволочек стальной сетки сравнимы с размерами обогащаемого материала, точки с высоким градиентом магнитного поля в этой сетке имеют размеры на 10-15 мкм меньше среднего размера частиц, закрепляться на них в точках максимальных градиентов могут только чистые магнетитовые зерна.

Она состоит из кассеты из тонких металлических проволочек, помещенной внутри соленоида, подключенного к источнику переменного тока. Напряженность магнитного поля в рабочем пространстве регулируется напряжением, подаваемым от внешнего источника в пределах от 0 до 40 кА/м. Исходный материал подается сверху в рабочую матрицу через загрузочное отверстие в виде пульпы, содержащей 20-25 % твердого. Частицы магнетита под воздействием магнитного поля накапливаются в

матрице, а промпродукт сливается самотеком под действием силы тяжести. В конце рабочего цикла для промывки матрицы от остатков пульпы подается вода. Концентрат, накопившийся в рабочей матрице, периодически разгружается после отключения электропитания так же при помощи промывки водой.

В качестве исходного продукта был взят концентрат Михайловского ГОКА с содержанием Fe 65,1 %. В результате обогащения было получено 28,44 % концентрата с содержанием Fe 68,3 %, извлечением 29,24 % и промпродукт с содержанием 63,7% Fe.

Применение данного метода позволяет получать концентраты товарного качества, пригодного для использования в бездомной металлургии не используя флотацию, что повышает экологическую безопасность, значительно сокращает затраты и соответственно повышает эффективность производства. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

---

*Кармазин Виктор Витальевич* – доктор технических наук, профессор,  
e-mail: [karmazin@mail.ru](mailto:karmazin@mail.ru)

*Сыса Павел Анатольевич* – аспирант, инженер, e-mail: [pavel\\_syssa@mail.ru](mailto:pavel_syssa@mail.ru)  
Московский государственный горный университет.



UDC 622.778

### **IMPROVEMENT IN THE QUALITY OF MAGNETIC CONCENTRATES IN THE HIGH-GRADIENT LOW-STRENGTH VARIABLE MAGNETIC SEPARATION**

*Karmazin V.V.*, Ph.D., Professor, e-mail: [karmazin@mail.ru](mailto:karmazin@mail.ru)  
*Sys P.A.*, Graduate Student, Engineer, e-mail: [pavel\\_syssa@mail.ru](mailto:pavel_syssa@mail.ru)  
Moscow State Mining University, Russia, [ud@msmu.ru](mailto:ud@msmu.ru)

*Magnetic force is the main force in extracting separation magnetism materials that provide large magnetic separation techno-economic advantages. This is the main advantage of magnetic methods and turns their main disadvantage - low selectivity of separation of minerals due to the phenomenon of magnetic flocculation. Basic equipment concentrators are drum separators, which have a limit on the iron content in the concentrate. In the final concentrate fall poor splices, its quality deteriorates. Nonmagnetic concentrates on fine-tuning methods either expensive or ineffective. The main costs are based on energy and are aimed at the destruction of intermolecular bonds in ores for mechanical separation of particles of beneficial minerals from gangue minerals. When applying a weak magnetic field and high-gradient spin system is not complete flocculation of the pulp occurs because this lacking of magnetic field and the material remains in a relatively freely suspended. Laboratory examination of the process was conducted in a pilot plant. It consists of a cassette of thin metallic wires placed inside the solenoid connected to an AC source. The study was able to improve the quality of the concentrate. This method allows to obtain concentrates commercial quality without using flotation, which increases environmental safety, significantly reducing costs and more economically profitable*

*Key words: magnetite concentrates, high-gradient separation, reduction metallurgy.*

## REFERENCES

1. Karmazin V.V., Karmazin V.I. Magnitnye, jelektricheskie i special'nye metody obogashhenija poleznyh. Tom I, Moskva, Izdatel'stvo MGGU. 2005 g.
2. Zhelezorudnaja baza Rossii / pod red. Orlova V.P., Verigina M.I., Golivkina N.I. – M.: ZAO «Geoinformmark», 1998. – 842 s. – ISBN 5 – 900357 – 07 – 4.
3. Avdohin V.M., Gubin S.L. Sovremennoe sostojanie i osnovnye napravlenija razvitiija processov glubokogo obogashhenija zheleznyh rud. M. Gornyj zhurnal, № 3, 2007 g.
4. Ostapenko P. E. Obogashhenie zheleznyh rud. M., Nedra, 1985.
5. Plaksin I.N., Karmazin V.I., Olofinskij N.F., Norkin V.V., Karmazin V.V. Novye napravlenija glubokogo obogashhenija tonkovkraplen-nyh zheleznyh rud. M., Nauka, 1964.
6. Karmazin V.V. Sovershenstvovanie tehnologii obogashhenija magnetitovyh kvarcitolov na osnove separatorov s begushhim magnitnym polem // Gornyj zhurnal. – 2006. - №6.
7. Kretov S.I., Gubin S.L., Potapov S.A. Sovershenstvovanie tehnologii pererabotki rud Miha-jlovskogo mestorozhdenija // Gornyj zhurnal. – 2006. - №7.
8. Otchetny NTC MGGU o vypolnenii rabot po hozdogovoram s OAO LGOK, OAO MGOK i OAO Rudgormash (temy OPI: 101, 104, 111, 228, 239, 248, 363) Moskva-Gubkin 2004-2007 gg.



## ГОРНАЯ КНИГА



### **Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 7. Освоение подземного пространства мегаполисов**

2013 г.  
256 с.  
ISBN: 0236-1493  
UDK: 69.035.4

Сборник содержит материалы IV Международного семинара «Проблемы освоения подземных пространств крупных мегаполисов», посвященный памяти заслуженного тоннелестроителя России А.М. Летуновского. Материалы сборника представляют интерес для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов технических специальностей.