

УДК 549.08

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНОСТИ ЗЕРЕН МАГНЕТИТА
НА МАГНИТНУЮ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ**

А. С. Опалев, В. В. Марчевская

*Горный институт Кольского научного центра РАН,
E-mail: a.opalev@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Изучено влияние крупности зерен магнетита в материале железорудных концентратов, расклассифицированного на ситовых анализаторах мокрого отсева. Исследования выполнены для концентратов, получаемых на трех ГОКах: АО “Олкон”, АО “Карельский окатыш”, АО “Стойленский ГОК”. Показано, что в материале < 50 мкм магнитная восприимчивость концентратов с уменьшением крупности частиц магнетита монотонно снижается, принимая минимальные значения в шламовых фракциях < 8 мкм.

Магнетит, магнетитовый концентрат, магнитная восприимчивость, классификация, шламы, магнитная сепарация

DOI: 10.15372/FTPRPI20230115

На железорудных предприятиях России и зарубежных стран основной процесс обогащения — мокрая магнитная сепарация. Традиционные технологические схемы переработки магнетитовых руд основаны на выводе из процесса хвостов после каждой стадии измельчения и магнитной сепарации с получением готового концентрата в последней стадии обогащения. Массовая доля железа общего в магнетитовых концентратах в России и за рубежом находится на уровне 66–68 %. Основной недостаток этих технологических схем — высокие удельные эксплуатационные расходы и достаточно высокая массовая доля диоксида кремния в получаемом концентрате.

Для удовлетворения спроса металлургии на высококачественные магнетитовые концентраты с содержанием железа общего 70 % и диоксида кремния 2.5 %, необходимые для прямого бездомного получения металла, в технологические схемы в качестве доводочных операций включают процессы промывки, гравитационного обогащения (отсадки, обогащения на концентрационных столах, винтовых сепараторах, в тяжелых суспензиях, в центробежных аппаратах), флотации и флотогравитации [1–6].

Для дообогащения чернового магнетитового концентрата используют мельницы вертикального типа Vertimill (Metso, Финляндия), работающие в замкнутом цикле с классифицирующими аппаратами (тонкое вибрационное грохочение) [7]. В настоящее время более актуальным становится создание высокоэффективных и экологически сбалансированных технологий переработки железорудного сырья [8–13]. Применение магнитно-гравитационного разделе-

ния в технологии получения железорудного концентрата в комбинации с тонким грохочением позволяет уже на начальных стадиях обогащения выводить из процесса концентрат высокого качества [8].

Сочетание в одном аппарате влияния магнитных и гравитационных сил способствует управлению агрегированием ферромагнитных частиц при воздействии на суспензию низкоинтенсивным магнитным полем и центробежно-восходящим водным потоком. Механизм разделения тонкоизмельченных минеральных частиц хорошо согласуется с теорией магнитно-стабилизированных ожигенных слоев. Эффективность разделения зависит от соотношения магнитных и гидродинамических сил, определяющего комплексность воздействия физических сил на ферросуспензию с возможностью регулирования технологических показателей разделения [8–12, 14–16].

Разработанная инновационная технология получения высококачественного концентрата из железистых кварцитов Заимандровской группы месторождений успешно внедрена на дробильно-обогащительной фабрике АО “Олкон” (Кольский полуостров). Реализована технологическая схема с выводом готового концентрата из первой и второй стадий обогащения на основе применения тонкого грохочения и магнитно-гравитационной сепарации. На АО “Карельский окатыш” в настоящее время внедряется технология получения высококачественного концентрата с использованием магнитно-гравитационной сепарации.

В промышленных условиях испытана технология повышения металлургической ценности магнетитовых концентратов Стойленского ГОКа на основе применения магнитно-гравитационной сепарации. Показана возможность использования технологии для получения из тонковкрапленных железистых кварцитов Стойленского месторождения высококачественной продукции, пригодной для бездоменной плавки [14].

Сверхтонкое измельчение магнетита приводит к значительным его потерям с хвостами магнитной сепарации из-за снижения магнитных свойств микронных и субмикронных частиц, обусловленных механохимическими преобразованиями структуры магнетита с частичным переходом его в α -гематит, и создает проблемы с фильтрацией, что может значительно ухудшить технологические показатели работы предприятия в целом [9]. В литературе отсутствуют данные об изменении магнитных свойств магнетита в зависимости от размера его зерен. Сообщается о снижении магнитной восприимчивости при крупности частиц < 70 мкм или о повышении массовой доли железа магнетитового в мелкой фракции хвостов сухого магнитного обогащения титаномагнетитовых руд [17]. Извлечению тонких частиц из различного минерального сырья разными методами посвящены работы [18–20].

В настоящей работе приведены результаты исследований влияния крупности зерен магнетита разных месторождений на его магнитную восприимчивость.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены на материале высококачественных магнетитовых концентратов, полученных из железистых кварцитов Оленегорской группы месторождений АО “Олкон”, железистых кварцитов Костомукшского месторождения АО “Карельский окатыш”, железных руд и железистых кварцитов Стойленского месторождения АО “Стойленский ГОК”. Содержание железа общего во всех концентратах составляло > 70 %.

Материал магнетитовых концентратов предварительно расклассифицирован на просеивающей машине — анализаторе мокрого отсева RETSCH AS 200 digit cA (Германия). Далее материал крупностью < 50 мкм подвергался разделению на анализаторе гранулометрического со-

става Cyclosizer M16 (Австралия), состоящем из напольного шкафа 1, на котором смонтированы пять циклонов 2, контейнер для проб 3, расходомер 4, манометр 5, термометр 6 и панель управления 7 (рис. 1). В нижней части шкафа расположен насос и водяной бак, соединенный с магистральным водопроводом.

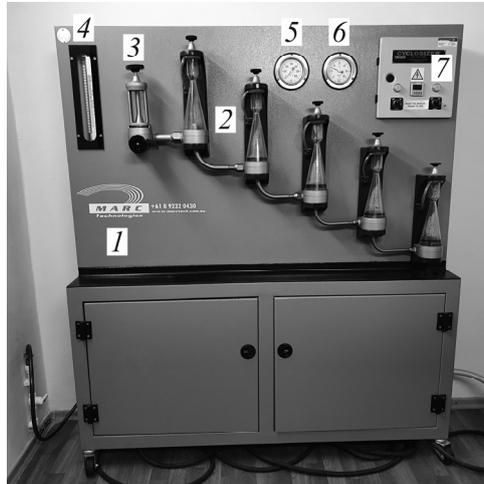


Рис. 1. Анализатор гранулометрического состава Cyclosizer M16

Cyclosizer M16 собирает в каждый гидравлический циклон частицы определенного диапазона размеров, имеющие одинаковую плотность. Конструктивно циклоны расположены таким образом, что вихревое выходное отверстие каждого предыдущего циклона является точкой подачи для последующего. Поскольку площадь впускного отверстия и диаметр вихревого выпускного отверстия каждого циклона в направлении потока уменьшаются, происходит последовательное уменьшение размеров собираемых частиц в каждом циклоне в том же направлении. Вихревое выпускное отверстие конечного пятого циклона имеет выход в слив. Cyclosizer M16 откалиброван в заводских стандартных условиях (при определенных скорости потока, температуры воды, плотности частиц и времени сепарирования), при которых определен предельный размер частиц каждого циклона. Эффективный (максимальный) размер частиц, собираемых в циклоне, определяется с учетом реальных параметров процесса разделения по формуле: $d_{ef} = d f_1 f_2 f_3 f_4$, где поправочные коэффициенты скорости потока f_1 , плотности частиц f_2 , температуры воды f_3 и времени сепарирования f_4 определяются графически.

По прошествии заданного времени сепарации собранный в каждом циклоне материал разгружается с помощью выпускного клапана в верхней части. Слив, состоящий из шламовых частиц, собирается отдельно в цилиндрические баки и подвергается отстаиванию.

Наиболее полно исследован материал магнетитового концентрата АО «Олкон» крупностью –0.16 мм, в котором выход класса +50 мкм составил ~60%. В магнетитовом концентрате Стойленского ГОКа после измельчения в вертикальной мельнице Vertimill VTM-3000-WB выход класса +50 мкм составил 10%, в исходном концентрате АО «Карельский окатыш» — менее 1%. Магнитная восприимчивость магнетитовых концентратов фиксировалась на малогабаритном приборе MS2 с измерителем MS2G (BARTINGTON Instrument, США) (рис. 2). Количественный минеральный состав исходных и расклассифицированных магнетитовых концентратов определен по данным рентгенофазового анализа с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра D2 PHASER (Bruker AXS GmbH, Германия), обработка дифрактограмм выполнена с помощью программного обеспечения Difrac.suite v.4.1.



Рис. 2. Малогабаритный измеритель магнитной восприимчивости MS2 с измерителем MS2G

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав исследованных концентратов, содержание магнетита и магнитная восприимчивость по классам крупности материала приведены в таблице и на рис. 3.

Гранулометрический состав магнетитовых концентратов, содержание магнетита в расклассифицированных магнетитовых концентратах и их магнитная восприимчивость

Размер частиц магнетита, мкм	АО "Олкон"	АО "Карельский окатыш"	АО "Стойленский ГОК"
Выход, %			
-160+100	25.92	—	—
-100+71	18.85	—	10.00
-71+50	15.41	0.82	
-50+33	8.18	12.94	11.04
-33+25	13.65	27.76	26.05
-25+17	5.43	24.60	17.22
-17+11	4.12	13.10	12.45
-11+8	2.13	6.12	6.45
-8+0	6.31	14.67	16.78
Исходная проба	100.000	100.00	100.00
Содержание магнетита, масс. %			
-160+100	87.22	—	—
-100+71	88.32	—	64.54
-71+50	90.32	—	
-50+33	94.30	97.43	94.86
-33+25	95.76	97.31	95.33
-25+17	95.30	94.39	95.87
-17+11	95.54	96.32	95.31
-11+8	95.04	95.31	95.67
-8+0	90.93	94.81	94.73
Исходная проба	90.83	94.00	92.07
Магнитная восприимчивость, ед. СИ			
-160+100	3.27	—	—
-100+71	3.28	—	1.54
-71+50	3.22	—	
-50+33	3.03	2.94	2.51
-33+25	2.62	2.78	2.38
-25+17	2.33	2.53	2.28
-17+11	2.09	2.35	2.08
-11+8	1.82	2.17	1.85
-8+0	1.38	1.64	1.49
Исходная проба	3.28	2.58	2.44

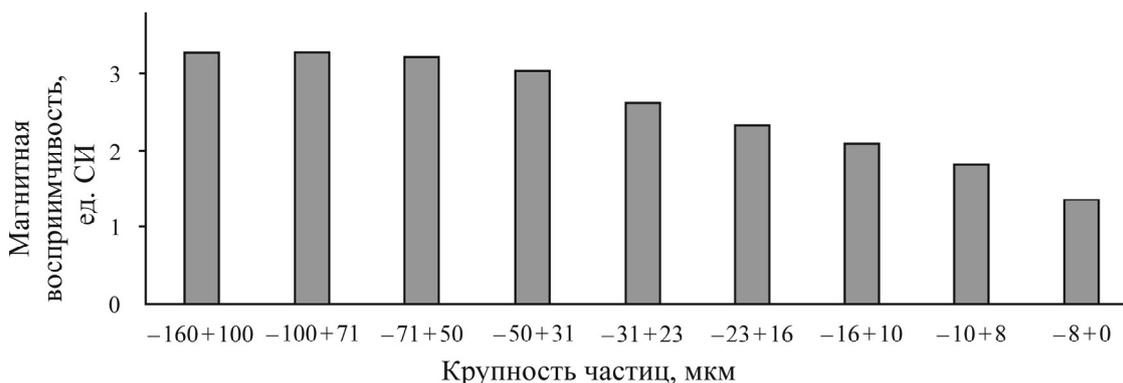


Рис. 3. Зависимость магнитной восприимчивости магнетитового концентрата Оленегорских месторождений АО “Олкон” от крупности частиц магнетита

Выход шламовой фракции -8 мкм в материале магнетитовых концентратов составляет от 6.3 % на АО “Олкон” до 14.7 и 16.8 % на АО “Карельский окатыш” и Стойленском ГОКа соответственно. Содержание магнетита в различных классах крупности концентратов меняется с 64.5 до 96.3 %, причем в материале всех концентратов < 50 мкм содержание магнетита превышает 94.0 %.

Низкое содержание магнетита в материале концентрата Стойленского ГОКа > 50 мкм обусловлено низкой степенью его раскрытия при повышенных содержаниях кварца, амфиболов, слюд, сульфидов, наличии карбонатов (сидерита, доломита, кальцита), глинистых минералов. Кроме магнетита, концентраты содержат кварц, амфиболы, слюды, оксиды железа, сульфиды. Амфиболы представлены рибекитом и грюнеритом, иногда минералами актинолит-тремолитового ряда; слюды — в основном биотитом; оксиды железа, кроме магнетита, — гематитом и гетитом; сульфиды — моноклинным пирротинном.

Магнитная восприимчивость магнетитового концентрата существенно зависит от крупности частиц магнетита (таблица, рис. 3). Для материала $-160 + 50$ мкм при достаточно хорошем раскрытии магнетита, которое присуще концентратам АО “Олкон”, магнитная восприимчивость практически не изменяется и принимает максимальные значения. В материале < 50 мкм магнитная восприимчивость концентратов с уменьшением крупности частиц магнетита монотонно снижается, принимая минимальные значения в шламовых фракциях < 8 мкм. Наиболее контрастное изменение наблюдается для магнетитового концентрата АО “Олкон”: соотношение магнитной восприимчивости шламовой фракции относительно исходного материала составляет 0.42; для концентратов Стойленского ГОКа и АО “Карельский окатыш” — 0.63.

Поскольку магнитная восприимчивость магнетитовых концентратов зависит от содержания магнетита, на рис. 4а представлены зависимости удельной магнитной восприимчивости (на единицу содержания магнетита) концентратов от максимальной крупности частиц в расклассифицированном на Cyclosizer M16 материале крупностью < 50 мкм. Дополнительный учет массы материала концентрата при измерениях магнитной восприимчивости вид кривых не меняет (рис. 4б).

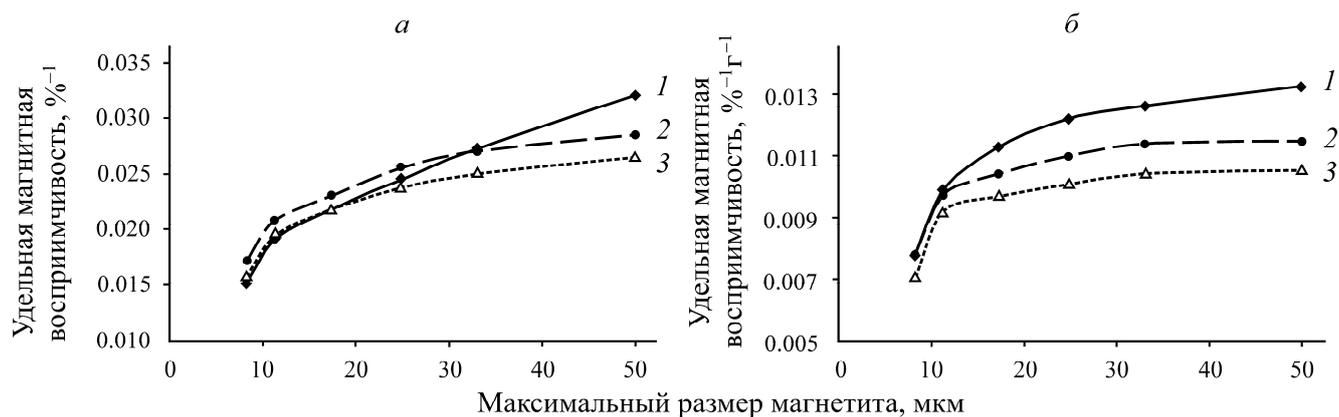


Рис. 4. Зависимость удельной магнитной восприимчивости магнетитовых концентратов от максимального размера частиц магнетита в пробе: *а* — с учетом содержания магнетита; *б* — с учетом содержания магнетита и массы пробы: 1 — АО “Олкон”; 2 — АО “Карельский окатыш”; 3 — Стойленский ГОК

ВЫВОДЫ

Исследовано влияние крупности зерен магнетита на магнитную восприимчивость магнетитовых концентратов, выпускаемых на ГОКах: АО “Олкон”, АО “Карельский окатыш”, АО “Стойленский ГОК”. Установлено монотонное снижение удельной магнитной восприимчивости магнетитовых концентратов с уменьшением крупности зерен магнетита. Результаты свидетельствуют о рациональности стадийного вывода железорудного концентрата для уменьшения потерь с хвостами мелких частиц магнетита мельче 10–15 мкм, в которых удельная магнитная восприимчивость снижается в 1.5 раза и более относительно исходного уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кусков В. Б., Сишук Ю. М. Совершенствование технологий обогащения железных руд различных типов и вещественного состава // Горн. журн. — 2016. — № 2. — С. 70–74.
2. Lu L. Iron ore: Mineralogy, processing and environmental sustainability, Cambridge, Woodhead Publishing, 2015. — 631 p.
3. Иванова К. К., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С., Турецкая Н. Ю. Получение высококачественного железорудного концентрата методом винтовой сепарации // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в XXI веке // Плаксинские чтения–2019. — 2019. — С. 243–246.
4. Гзогян Т. Н. Теоретические и экспериментальные исследования получения высококачественных концентратов // ГИАБ. — 2010. — № 4. — С. 389–393.
5. Прокопьев С. А., Пелевин А. Е., Напольских С. А., Гельбинг Р. А. Стадиальное выделение магнетитового концентрата с использованием винтовой сепарации // Обогащение руд. — 2018. — № 4. — С. 28–33.
6. Makinde O. A., Ramatsetse B. I., and Mprofu K. Review of vibrating screen development trends: Linking the past and the future in mining machinery industries, Int. J. Miner. Proc., 2015, Vol. 145. — P. 17–22.
7. Щербаков А. В., Гурьев А. В., Чередниченко М. В. Внедрение инновационной технологии повышения металлургической ценности концентратов АО “Стойленский ГОК” // Горн. журн. — 2021. — № 6. — С. 81–85.

8. **Опалев А. С., Хохуля М. С., Фомин А. В., Карпов И. В.** Создание инновационных технологий производства высококачественного железорудного концентрата на предприятиях Северо-Запада России // Горн. журн. — 2019. — № 6. — С. 56–61.
9. **Опалев А. С.** Повышение качества магнетитовых концентратов на основе магнитно-гравитационной сепарации // Горн. журн. — 2020. — № 9. — С. 72–77.
10. **Гзогян С. Р., Гзогян Т. Н., Лифанов Д. В., Чередниченко М. В.** Внедрение инновационной технологии повышения металлургической ценности концентратов АО “Стойленский ГОК” // Горн. журн. — 2021. — № 6. — С. 76–81.
11. **Dauce P. D., de Castro G. B., Lima M. M. F., and Lima R. M. F.** Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings, *J. Materials Res. Technol.*, 2019, Vol. 8, Issue 1. — P. 1052–1059.
12. **Chang Tang, Keqing Li, Wen Ni, and Duncheng Fan.** Recovering iron from iron ore tailings and preparing concrete composite admixtures, *Minerals*, 2019, Vol. 9, Issue 4. — P. 232.
13. **Bhadani K., Asbjornsson G., Hulthen I., and Evertsson M.** Application of multi-disciplinary optimization architectures in mineral processing simulations, *Miner. Eng.*, 2018, Vol. 128. — P. 27–35.
14. **Гзогян С. Р., Щербаков А. В.** Повышение качества концентратов АО “Стойленский ГОК” с использованием магнитно-гравитационной сепарации // Обогащение руд. — 2020. — № 6. — С. 3–8.
15. **Espin M. J., Quintanilla M. A. S., and Valverde J. M.** Magnetic stabilization of fluidized beds: Effect of magnetic field orientation, *Chem. Eng. J.*, 2017, Vol. 313. — P. 1335–1345.
16. **Quanhong Zhu, Hongzhong Li, Qingshan Zhu, and Qingshan Huang.** Modeling of segregation in magnetized fluidized bed with binary mixture of Geldart-B magnetizable and nonmagnetizable particles, *Chinese J. Chem. Eng.*, 2018, Vol. 26, Issue 6. — P. 1412–1422.
17. **Пелевин А. Е., Сытых Н. А., Черепанов Д. В.** Влияние крупности частиц на эффективность сухой магнитной сепарации // ГИАБ. — 2021. — № 11-1. — С. 293–305.
18. **Хохуля М. С., Алексеева С. А., Черезов А. А., Фомин А. В.** Изучение процессов измельчения и гравитационно-магнитного разделения редкометалльных руд для оптимизации комбинированной технологии их обогащения // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 168–181.
19. **Ган Ф., Пенг К., Янг Б.** Процесс извлечения железа в концентрат из твердых отходов горного производства // ФТПРПИ. — 2020. — № 4. — С. 181–190.
20. **Дядин В. И.** Электродинамическая сепарация тонких частиц в импульсном бегущем магнитном поле // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 124–130.

Поступила в редакцию 03/XI 2022

После доработки 10/XII 2022

Принята к публикации 19/I 2023