

УДК 622.7

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ
ОКИСЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ПОСЛЕ ОБЖИГА****Г. И. Газалеева, А. Ал. Мушкетов, И. А. Власов,
А. Ан. Мушкетов, Н. А. Сопина***ОАО “Уралмеханобр”, E-mail: gazaleeva_gi@umbr.ru,
ул. Хохрякова, 87, 620144, г. Екатеринбург, Россия*

Исследован процесс мокрого магнитного обогащения обожженной руды месторождения Абаил, Республика Казахстан. Изучен процесс кинетики измельчения обожженного продукта и рекомендована оптимальная крупность первой стадии измельчения — 55–60 % содержания класса –0.071 мм. Выполнен магнитный анализ продуктов различной крупности, который показал, что при снижении крупности материала прироста железа в магнитный продукт не происходит, а массовая доля железа находится на уровне 63.0 %. С использованием сканирующего электронного микроскопа, выявлено наличие в обожженном и магнитном продуктах флоккул породных и магнетитовых частиц, которые переходят в магнитную фракцию, ухудшая ее качество. Предложены две схемы разрушения флоккул: стадийная дешламация материала по скорости осаждения в жидкой среде и оттирка с добавлением диспергатора. Рекомендована двухстадийная технологическая схема с измельчением, дешламацией и мокрой магнитной сепарацией, которая позволяет получить железный концентрат с содержанием железа 67 % при его извлечении 76.5 %.

Обжиг магнитный, метод обогащения, мокрая магнитная сепарация, флоккуляция, дешламация, оттирка

DOI: 10.15372/FTPRPI20190117

Цель настоящей работы — разработка технологической схемы обогащения обожженной железной руды месторождения Абаил. Исходные железные руды месторождения представлены окисленными формами — минералами гетита, гидрогетита и сидерита [1]. Согласно [2, 3], руды подобного состава обогащаются обжигмагнитным методом. Предварительные исследования позволили подобрать параметры обжига данной руды [4]. Далее проведены исследования по разработке схемы обогащения с использованием мокрой магнитной сепарации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований являлась обожженная железная руда месторождения Абаил. Обжиг пробы руды крупностью –5+0 мм проводился на установке, представленной на рис. 1. Ниже приведены параметры обжига обожженной руды:

Масса навески руды, г	947.50
Масса угля, г	60.00
Масса обожженной руды, г	846.40
Масса железорудной части*, г	824.30

Масса золы угля*, г	22.1
Температура обжига (максимальная), °C	900
Выдержка при максимальной температуре	Отсутствует

*Указаны расчетные данные на основе потери при прокаливании соответствующих компонентов

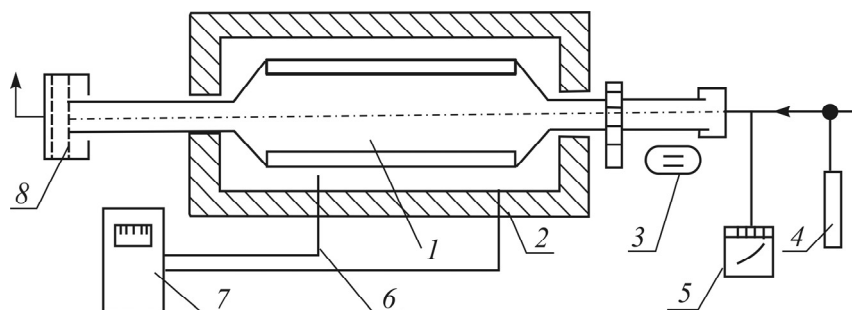


Рис. 1. Установка для восстановительного обжига: 1 — барабан с полками; 2 — нагревательная печь; 3 — электромотор с редуктором; 4 — газовый расходомер; 5 — прибор для записи температуры газа; 6 — термопары; 7 — терморегулятор; 8 — фильтр-пылеуловитель

В табл. 1, 2 отражены химический и гранулометрический составы обожженной руды. Отметим, что после обжига материал сразу охлаждался водой с целью не допустить окисления.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав обожженной руды, %

Компонент	Массовая доля	Компонент	Массовая доля
Fe	50.3	SiO ₂	8.79
FeO	19.1	MgO	0.46
MnO	2.09	Al ₂ O ₃	0.89
CaO	8.01	Прочие	29.46

ТАБЛИЦА 2. Гранулометрическая характеристика обожженной руды, %

Класс крупности, мм	Выход	Массовая доля		Распределение	
		Fe	FeO	Fe	FeO
–5.0+2.5	31.83	50.7	19.86	31.71	33.10
–2.5+1.0	35.41	47.5	18.50	33.05	34.30
–1.0+0.5	13.58	55.7	20.20	14.86	14.36
–0.5+0.0	19.14	54.2	18.20	20.38	18.24
Итого	100.00	50.9	19.10	100.00	100.00

Обожженная руда исследовалась с применением современного обогащенного оборудования: шаровой мельницы; мокрых магнитных сепараторов (ММС) на постоянных магнитах с различной напряженностью магнитного поля; магнитного анализатора; дешламатора и оттирочной машины типа ОМ-2. Обожженный продукт крупностью –2+0 мм измельчался в шаровой мельнице объемом 7 л. Масса единичной навески для измельчения составила 1 кг, продолжительности измельчения — 5, 10, 20, 40 мин. По результатам экспериментов рассчитана удельная производительность мельницы по известной формуле [5]. Конечные и промежуточные продукты обогащения исследовались на электронном сканирующем микроскопе EVO MA 15 (Carl Zeiss, Германия) с использованием современного комплекса программных продуктов “INCA” и “AZtec” (Великобритания, Оксфорд). Также проводился количественный химический и фазовый анализы пробы по утвержденным методикам [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения параметров измельчения обожженного продукта проведены эксперименты по изучению кинетики измельчения и построены гранулометрические характеристики при различном времени измельчения (рис. 2).

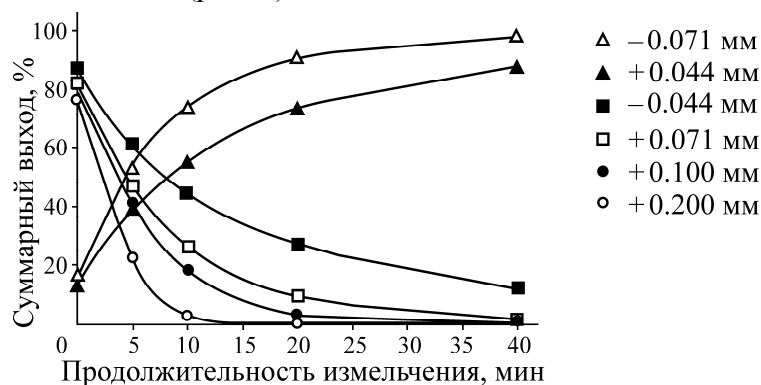


Рис. 2. Гранулометрические характеристики обожженного продукта при различном времени измельчения

Рассчитанные удельные производительности измельчения в лабораторной шаровой мельнице представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Удельная производительность лабораторной шаровой мельницы при измельчении обожженного продукта

Продолжительность измельчения, мин	Массовая доля класса $-0.071 + 0$ мм, %		Удельная производительность измельчения, кг/(ч·л)
	В питании мельницы	В сливе мельницы	
4.5	17.25	50	0.624
6.2		60	0.591
8.5		70	0.532
12.5		80	0.430
20.0		90	0.312
40.0		98	0.173

Эксперименты показали, что при снижении крупности измельчения с 50 до 98 % содержания класса -0.071 мм происходит снижение удельной производительности лабораторной мельницы по данному классу с 0.624 до 0.173 кг/(ч·л). Данный показатель может в дальнейшем использоваться при выборе и расчете промышленной мельницы [7, 8].

На следующем этапе исследований каждый измельченный продукт различной крупности подвергли мокрой магнитной сепарации при напряженности магнитного поля 1500 Э [9, 10]. Результаты экспериментов представлены в табл. 4.

Анализ показал, что в крупности $-2 + 0$ мм получен магнитный продукт с массовой долей железа 60.5 %. При снижении крупности измельченного продукта от $-2 + 0$ до 53 % содержания класса -0.071 мм происходит увеличение массовой доли железа в магнитном продукте до 63.2 %. Выход магнитного продукта составил 72.96 %, извлечение железа в магнитный продукт — 91.23 %. При дальнейшем снижении крупности материала прироста железа в магнитный продукт не происходит, массовая доля железа находится на уровне 63 %. На основании анализа полученных результатов оптимальная крупность первой стадии измельчения предложена 55–60 % содержания класса -0.071 мм.

ТАБЛИЦА 4. Результаты мокрой магнитной сепарации обожженного материала при различной крупности, %

Продукт обогащения	Выход	Массовая доля		Извлечение	
		Fe	FeO	Fe	FeO
$t_{\text{изм}}=0$ мин, $-2+0$ мм					
Магнитный	76.92	60.50	21.80	92.89	96.35
Немагнитный	23.08	15.43	2.75	7.11	3.65
Исходный	100.00	50.10	17.40	100.00	100.00
$t_{\text{изм}}=5$ мин, 53 % кл. $-0.071+0$ мм					
Магнитный	72.96	63.20	23.70	91.23	95.19
Немагнитный	27.04	16.39	3.23	8.77	4.81
Исходный	100.00	50.54	18.16	100.00	100.00
$t_{\text{изм}}=10$ мин, 74 % кл. $-0.071+0$ мм					
Магнитный	71.79	63.30	23.90	90.61	95.06
Немагнитный	28.21	16.69	3.16	9.39	4.94
Исходный	100.00	50.15	18.05	100.00	100.00
$t_{\text{изм}}=20$ мин, 90 % кл. $-0.071+0$ мм					
Магнитный	70.05	63.00	23.70	87.89	92.29
Немагнитный	29.95	20.30	4.63	12.11	7.71
Исходный	100.00	50.21	17.99	100.00	100.00

Кроме того, при пересортировке данного продукта в операции ММС с использованием магнитного поля более низкой напряженности (порядка 1000 Э) повысить содержание железа в концентрате также не представляется возможным. Фактически продукт делится пополам с одинаковым содержанием железа в магнитном и немагнитном продуктах.

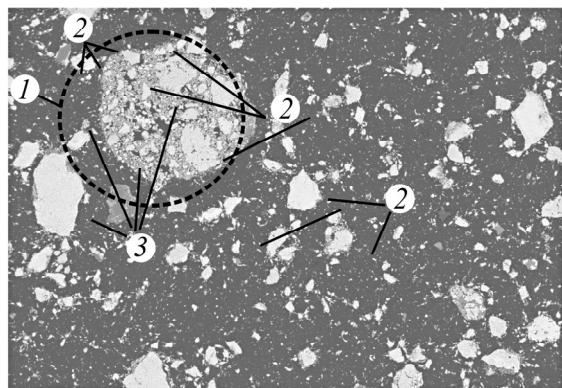
Для изучения причин пониженного содержания железа в концентрате крупностью 90 % класса -0.071 мм и невозможности его повышения с помощью традиционных пересортичных операций выполнен его минералогический анализ [11]. На рис. 3 представлена фотография аншлифа магнитного продукта крупностью 90 % класса -0.071 мм, полученная средствами электронной микроскопии.

Результаты минералогического анализа показали, что в магнитном продукте кроме раскрытых зерен железорудных минералов (магнетит, гематит, гетит) и зерен минералов породы (преимущественно минералы кальция и магния) также присутствуют их совместные агрегаты (флоккулы), состоящие из зерен перечисленных минеральных групп, имеющих различные текстуры вплоть до тонкой и весьма тонкой.

На рис. 4 и в табл. 5 приведены карты исследуемых областей аншлифа магнитного продукта в которых определен вещественный состав при помощи средств электронной микроскопии. Определение химического состава области зерна “Спектр 39”, визуально диагностируемого как породное и входящего в состав флоккулы, показало преимущественное содержание кальция и кислорода (44.9 и 52.3 % соответственно) при минимальном содержании железа (2.4 %). Результаты электронной микроскопии выявили, что подобных зерен в исследуемой флоккуле содержится достаточно много. Вероятной причиной флоккуляции является быстрое охлаждение обожженного продукта водой.

Наличие сфлоккулированных породных зерен с магнетитом приводит к снижению содержания железа в магнитном продукте. Флоккулы обладают достаточно сильными магнитными свойствами, и при сепарации будут извлекаться в магнитный продукт. Именно наличие подобных

флоккул мешает повышению содержания железа в концентрате свыше 63 %. Таким образом, разбив флоккулы, можно эффективно отделить магнетит от породных частиц, сконцентрированных во флоккулах. Предложено два метода разрушения флоккул: стадийная дешламация материала по скорости осаждения в жидкой среде и оттирка с добавлением диспергатора.



Аншлиф, SEM, QBSD

Рис. 3. Флоккулы зерен магнетита и породы: 1 — флоккула; 2 — зерна железорудных минералов; 3 — зерна нерудных минералов

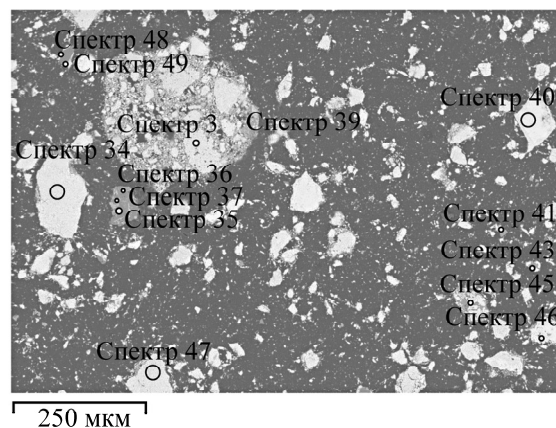


Рис. 4. Карта областей аншлифа для определения вещественного состава

ТАБЛИЦА 5. Вещественный состав областей зерен в магнитном продукте, мас. %

Анализируемая область (спектр)	Fe	O	Ca	Si	Mn	Mg	F	P
34	73.7	26.1	0.2	—	—	—	—	—
35	—	51.7	0.2	—	—	—	—	—
36	1.2	53.4	45.3	—	—	—	—	—
37	—	37.4	38.1	—	—	—	4.0	18.8
38	72.6	25.2	—	1.0	0.6	—	—	—
39	2.4	52.3	44.9	0.1	—	0.2	—	—
40	68.6	27.1	0.3	2.1	1.8	—	—	—
41	1.3	53.4	44.7	—	—	0.6	—	—
43	2.8	52.7	44.4	—	—	—	—	—
44	1.6	52.6	45.5	—	—	0.3	—	—
45	67.4	25.9	1.7	0.4	4.6	—	—	—
46	71.7	26.8	0.3	1.0	—	—	—	—
47	71.4	26.2	—	1.2	1.2	—	—	—
48	0.9	51.4	—	47.7	—	—	—	—
49	69.4	26.5	0.4	1.7	1.3	0.5	—	—

Примечание. Прочерк — ниже предела обнаружения

Дешламация измельченного обожженного продукта в крупности 60 % класса -0.071 мм показала возможность прироста содержания железа в обесшламленном продукте на 4–6 %, что позволило при последующей мокрой магнитной сепарации (ММС) получить магнитный продукт с массовой долей железа 64–65 %. Чтобы достигнуть, более высокого содержания железа в конечном концентрате, проведена вторая стадия измельчения до крупности 90 % класса -0.071 мм с последующей дешламацией, и ММС в две стадии (напряженность магнитного поля ММС второй стадии составила 1100 Э). Предложенная схема с расчетом технологических показателей приведена на рис. 5.

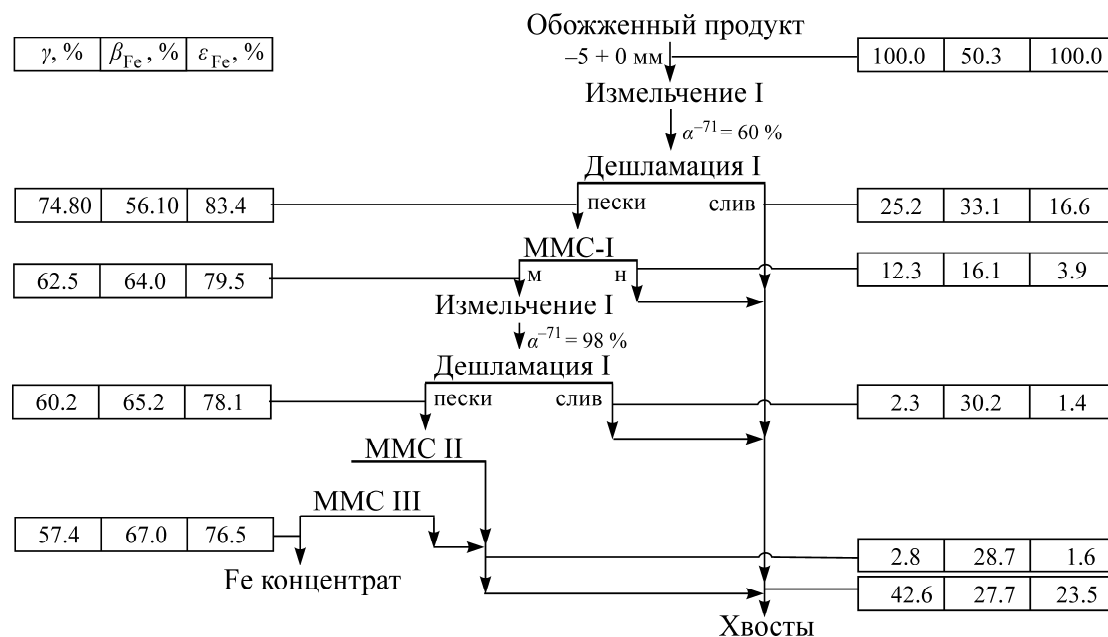


Рис. 5. Предлагаемая схема обогащения обожженной руды с дешламацией

Разработанная схема обогащения позволяет получить железный концентрат с содержанием железа 67.0 %, выход концентрата 57.4 %. Извлечение железа в хвосты составляет 23.5 %, что является нормой при обогащении окисленных железных руд с использованием магнетизирующего обжига.

Оттирка железного концентрата, полученного после обжига и первичной ММС (табл. 4) с содержанием железа 63 %, проведена в оттирочной машине ОМ-2 с добавлением в качестве диспергатора гексаметафосфата (ГМФ) в количестве 50 г/т. Результаты экспериментов по оттирке и расчет технологической схемы приведены на рис. 6.

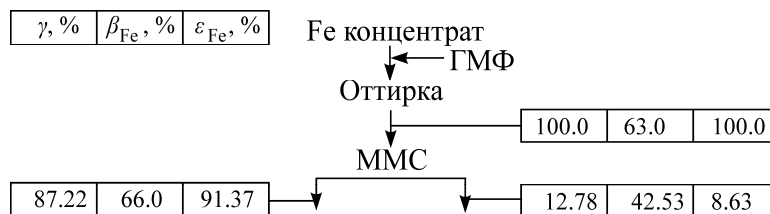


Рис. 6. Результаты ММС с предварительной оттиркой

В результате оттирки и последующей мокрой магнитной сепарации (напряженность магнитного поля ММС — 1500 Э) получены высокие технологические показатели: выход железного концентрата 87.22 %, содержание в нем железа общего — 66.0 % при извлечении железа в концентрат — 91.37 %. Однако окончательно рекомендована схема с дешлампацией, так как оттирочные машины имеют низкую производительность [12].

ВЫВОДЫ

Исследование процесса мокрого магнитного обогащения обожженной окисленной руды месторождения Абайл выявило наличие в ней флоккулов, включающих наряду с минералами пустой породы частицы магнетита, что не позволяет получить по магнитной схеме железный концентрат с содержанием железа выше 63 % даже с понижением его крупности до 90 % класса менее 0.071 мм и перечисткой. Вероятной причиной флоккуляции является быстрое охлаждение обожженного продукта водой.

Для разрушения флоккул и повышения качества железного концентрата предложено две схемы мокрого магнитного обогащения обожженной руды: со стадийной дешламацией и с оттиркой. Схема с дешламацией включает двухстадийное измельчение с последующей дешламацией и мокрой магнитной сепарацией и позволяет получить железный концентрат с содержанием железа 67 % при его извлечении 76.5 %. Схема с оттиркой предназначена для переработки железного концентрата, полученного после измельчения обожженной руды до крупности 60 % класса менее 0.071 мм, и мокрой магнитной сепарации. Концентрат подвергается оттирке в аппарате ОМ-2 с добавлением диспергатора гексаметафосфата в количестве 50 г/т и последующей ММС. Технологическая схема позволяет получить железный концентрат с содержанием железа 66 % и извлечением 91.37 %, но не может быть рекомендована из-за низкой производительности оттирочной машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурыбаева А. А. Геология Казахстана. — Алма-Аты, 1999. — 159 с.
2. Gao P., Yu J. W., Han Y. X., and Li Y. J. Investigation on reaction behaviors of Anshan-type carbonate-bearing iron ore fines by fluidized roasting, XXIX Int. Mineral Proc. Congr. IMPC 2018, Moscow, 2018. — P. 235–237.
3. Yu J., Han Y., Li Y., and Gao P. Recovery and separation of iron from iron ore using innovative fluidized magnetization roasting and magnetic separation, J. Min. Metall., Sect. B, 2018, Vol. 54, No. 1. — P. 21–27.
4. Гурман М. А., Щербак Л. И. Комбинированные методы обогащения гематит-браунитовой руды // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 144–159.
5. Ревашвили Б. И., Сажин Ю. Г. Расчеты схем рудоподготовки и выбор дробильно-измельчительного оборудования. Измельчение: учеб. пособие. — Алма-Ата: КазПТИ, 1985. — 212 с.
6. Федорова М. Н., Криводубская К. С., Осокина Г. Н. Фазовый химический анализ руд черных металлов и продуктов их переработки. — М.: Недра, 1972. — 115 с.
7. Газалеева Г. И., Братыгин Е. В., Власов И. А., Мамонов С. В., Рогожин А. А., Курков А. В. Влияние тонких шламов на выбор схем рудоподготовки ниобиевых руд // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 170–177.
8. Газалеева Г. И. Теория, технология и техника процессов измельчения минерального сырья. — Екатеринбург: ТУ УГМК, 2017. — 352 с.
9. Yu J. W., Han Y. X., Li Y. J., and Gao P. Investigation on pre-concentration efficiency of a low grade hematite ore using magnetic separation, XXIX Int. Mineral Proc. Congr. IMPC, Moscow, 2018. — P. 122–124.
10. Shen B. F. Geological characters and resource prospect of the BIF type iron ore deposits in China, Acta Geologica Sinica, 2012, 86 (09). — P. 1376–1395.
11. Гурман М. А., Щербак Л. И. Технологическая минералогия и первичное обогащение магнетитовой руды месторождения Поперечного // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 157–167.
12. Бузунова Т. А., Шихов Н. В., Шигаева В. Н., Назаренко Л. Н., Бойков И. С. Разработка технологической схемы по производству стекольных и формовочных кварцевых песков // Материалы междунар. науч.-техн. конф. “Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья” 19–20 апреля 2017 г. — Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2017. — С. 105–109.

Поступила в редакцию 10/XII 2018

После доработки 28/I 2019

Принята к публикации 29/I 2019