

Комплексные исследования по получению окисленных окатышей из бурожелезняковой руды

Лопатин Ю. Н.¹, Мушкетов А. А.^{1,2*}, Дмитриева Е. Г.¹

¹ Научно-исследовательский и проектный институт «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

² Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма, Свердловская обл., Россия

*e-mail: maas@yandex.ru

Реферат

Введение. В настоящее время основным сырьем для производства чугуна и стали на металлургических комбинатах являются железные концентраты, получаемые из магнетитовых или железистых кварцитов, титаномагнетитовых и скарновых руд. Существующие технологии переработки этих типов руд, включающие в основном процессы разделения по магнитным свойствам, крупности, равнопадаемости и смачиваемости, позволяют получать как рядовые железные концентраты, так и высококачественные. Использование таких схем при переработке бурых железняков не обеспечивает высокие показатели обогащения. Одним из способов переработки подобного типа руд является обжиг-магнитная схема обогащения, которая позволяет перевести слабомагнитные (немагнитные) формы железа в сильномагнитные.

Цель. Разработка режима магнетизирующего обжига бурожелезняковой руды, технологии обогащения обожженного продукта для получения железного концентрата и окисленных окатышей.

Методика. Определены продолжительность термообработки шихты, состоящей из железной руды месторождения Абаил и угля Экибастузского месторождения, и необходимая массовая доля углерода твердого, находящегося в составе угля. Проведены технологические исследования обожженного продукта с целью получения концентрата с массовой долей железа не менее 67 %. По разработанной технологии наработана партия железного концентрата с целью получения и исследования сырых и окисленных окатышей.

Результаты. Разработаны режимы магнетизирующего обжига окисленной железной руды месторождения Абаил и охлаждения обожженного материала. Разработана схема обогащения обожженного материала с целью получения концентрата с массовой долей железа не менее 67 %. Изучен процесс получения прочных сырых и обожженных окатышей из железного концентрата.

Выводы. Разработанный режим термообработки шихты, состоящей из угля и руды месторождения Абаил, позволяет получить обожженный продукт со степенью магнетизации 93 %. Использование предварительной дешламации обожженного продукта позволяет удалить из переработки магнитные флоккулы, снижающие качество концентрата, и получить в последней стадии магнитного обогащения концентрат с массовой долей железа не менее 67 %. Из полученного железного концентрата возможно получение окисленных окатышей с прочностью не менее 200 кг/ок. при температуре обжига 1325 °С.

Ключевые слова: магнетизирующий обжиг; железный концентрат; окисленная железная руда; гетит и гидрогетит; окатыши; степень магнетизации; мокрая магнитная сепарация; дешламация.

Введение. Основным сырьем для получения железных концентратов являются три промышленных типа железных руд: железистые кварциты, скарновые и титаномагнетитовые руды. Существующие технологии переработки этих типов руд включают процессы разделения не только по магнитным свойствам, но и по крупности, равнопадаемости, смачиваемости. Они позволяют получать как рядовые железные концентраты, так и высококачественные [1–14]. Окускованные ря-

довые железные концентраты используются при переработке в доменном процессе с последующим конвертированием чугуна для получения рядовой стали. Высококачественные концентраты в виде окатышей направляются на металлургическую в шахтные печи для получения губчатого железа и последующей электроплавки [15].

Единственный промышленный тип железной руды, из которого достаточно сложно получать железные концентраты с кондиционными содержаниями вредных и шлакообразующих примесей, – бурые железняки. Окисленные руды этого типа являются наиболее труднообогатимыми и в переработку, как правило, не вовлекаются. Промышленную переработку такого типа руд на территориях России и стран ближнего зарубежья осуществляют только на Бакальском рудоуправлении (Российская Федерация), перерабатывающем руду Ново-Бакальского месторождения по обжиг-магнитной схеме, и на обогатительной фабрике (ОФ) Лисаковского ГОКа, перерабатывающей руду Лисаковского месторождения (Республика Казахстан) по гравитационно-магнитной схеме. Основное сырье для производства железного концентрата на Бакальском рудоуправлении – сидеритовая руда, бурый железняк является сопутствующим типом руды [16].

Еще одним перспективным месторождением бурожелезняковой руды Республики Казахстан, разработка которого планируется в ближайшие годы, является месторождение Абаил. Месторождение расположено на юге Казахстана и представлено окисленными железными рудами. Основные рудные минералы – гетит и гидрогетит. Нерудные минералы – в основном карбонаты и кварц.

Проведенные ранее исследования по термической обработке исходной руды месторождения Абаил с массовой долей железа 57 % заключались в ее обжиге в окислительной и восстановительной средах [17–21].

Термообработка окисленной руды в присутствии восстановителя позволяет перевести слабомагнитные железные минералы в магнетит. При этом качество железного концентрата, получаемого из обожженной руды, становится выше, но и себестоимость схемы переработки обожженной руды значительно возрастает [22]. При восстановлении руды месторождения Абаил в присутствии угля Шубаркольского месторождения получен железный концентрат с массовой долей железа 62,2 % [17]. При восстановлении руды продуктами пиролиза нефти в железном концентрате получена массовая доля железа 68,45 % [18].

Термообработка руды месторождения Абаил в окислительной атмосфере за счет дегидратации позволяет перевести гидроокислы железа в гематит с повышением массовой доли железа в обожженной руде с 57 до 62,86 % [19].

Переработка восстановленной руды магнитным методом обогащения осложнена высокой остаточной намагниченностью получаемого восстановленного магнетита, которая больше аналогичного показателя природного магнетита в 2–2,5 раза, и возможным наличием в зернах порообразующих минералов эмульсионных вкраплений восстановленного магнетита [23].

Высокая остаточная намагниченность восстановленного магнетита осложняет разрушение образующихся магнитных агрегатов (флокулов), включающих кроме зерен магнетита и его сростков раскрытые зерна нерудных минералов. Это приводит к снижению качества железного концентрата и эффективности классификации в замкнутых циклах измельчения [23].

Наличие после магнетизирующего обжига тонких вкраплений зерен магнетита в нерудных минералах, первоначально (до обжига) связанных с окисленными железными минералами, приводит к возникновению у сростков пограничной магнитной восприимчивости, при которой появляется возможность перехода магнетитовых сростков в концентрат и их потеря с хвостами [23].

Цели исследований. Перечисленные особенности переработки окисленных железных руд позволяют сформулировать основные цели исследований:

- разработка режима магнетизирующего обжига зерен окисленной руды;
- разработка технологической схемы обогащения для получения железного концентрата, пригодного для получения окатышей;
- разработка режима для получения окатышей для последующей металлургической переработки.

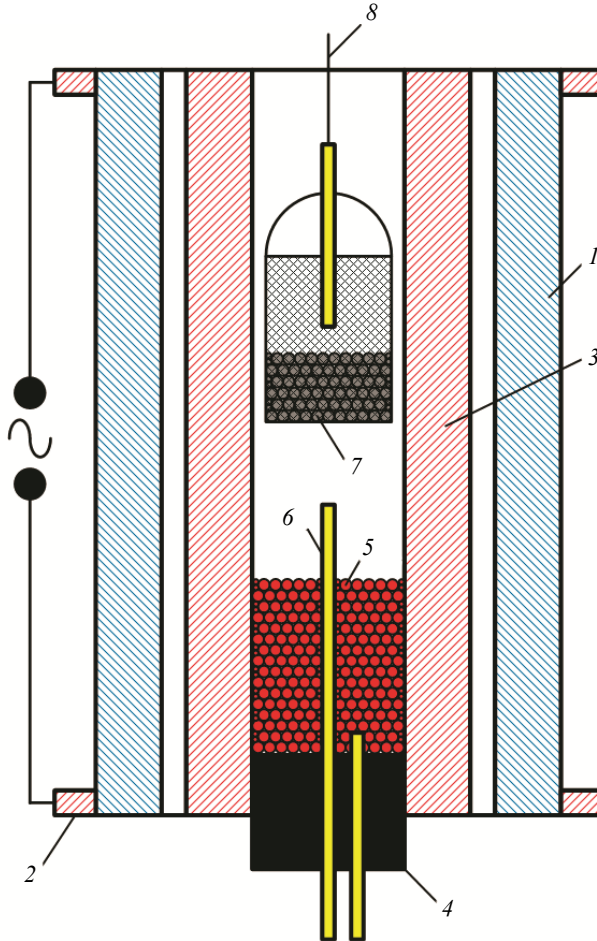


Рисунок 1. Принципиальная схема обжига руды в печи Таммана:

1 – нагреватель (угольная труба); 2 – контактные кольца; 3 – корундовая труба; 4 – резиновая пробка; 5 – шамотная засыпка; 6 – термопары; 7 – корзинка с шихтой; 8 – тросик

Figure 1. Schematic diagram of ore roasting in a Tamman furnace:

1 – heater (coal pipe); 2 – contact rings; 3 – corundum pipe; 4 – dummy; 5 – fire clay filling; 6 – thermocouples; 7 – basket with charge; 8 – cable

Исходные материалы. Исследования проведены на классе крупности $-5+3$ мм, выделенном из руды крупностью $-5+0$ мм. При магнетизации руды в качестве восстановителя использован уголь Экибастузского месторождения крупностью $-3+1$ мм с массовой долей углерода 36,8 %, массовой долей летучих веществ 27,3 % и зольностью 35,9 %.

Методика и результаты исследований. Лабораторные исследования по магнетизирующему обжигу проведены в трубчатой печи Таммана. Принципиальная схема обжига в печи Таммана представлена на рис. 1.

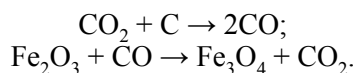
Печь имеет угольный нагреватель и дополнительно вставленную корундовую трубу диаметром 50 мм и длиной 1000 мм. Измерение температуры в изотермической зоне печи осуществляется нижней (неподвижной) и верхней (подвижной) термопарами. Высота изотермической зоны составляет от 100 до 120 мм.

Таблица 1. Зависимость показателей термообработки шихты от продолжительности термообработки и массовой доли углерода твердого в шихте
Table 1. Dependence between the charge thermal processing indicators and the duration of heat treatment and the mass fraction of solid carbon in the charge

Продолжительность термообработки, мин	Массовая доля, %		Степень магнетизации, %
	Fe	FeO	
<i>Массовая доля углерода твердого 2,5 %</i>			
0	46,2	0,48	2,41
14	50,1	14,5	67,44
19	50,4	18,7	86,45
24	52,3	20,2	89,99
<i>Массовая доля углерода твердого 5,7 %</i>			
0	42,0	0,45	2,50
14	46,6	17,9	89,50
19	50,7	20,2	92,83
24	50,3	20,8	96,35
<i>Массовая доля углерода твердого 7,4 %</i>			
0	39,8	0,44	2,55
14	46,3	20,2	101,65
19	45,0	20,5	106,14
24	49,0	22,7	107,94

Схема опыта заключалась в следующем. Из руды крупностью $-5+3$ мм и угля крупностью $-1,6+1,0$ мм формировались пробы шихты с различными соотношениями по массе руды и восстановителя, которые помещались в корзину с размером отверстий квадратной ячейки 0,5 мм. Высота слоя зерен шихты не превышала 50 мм, что позволяло поместить ее в изотермическую зону печи. Исследуемый материал обжигался в изотермической зоне, причем нижняя часть корзины подводилась на расстояние до 5–7 мм к спаяу стационарной термопары. После обжига для фиксации процесса обожженная проба охлаждалась в воде. Восстановительная атмосфера в печи создавалась монооксидом углерода, полученным после восстановления углекислого газа углеродом, находящимся в составе угля в шихте, с расходом 3 л/мин через шамотную набивку.

В процессе магнетизирующего обжига окисленной руды твердым углеродом восстановление происходило зонально в направлении от поверхности зерен к их центру. При этом протекали следующие основные химические реакции в пересчете на Fe_2O_3 :



Исследования проведены на пробах шихты с массовой долей углерода твердого 2,5; 5,7 и 7,4 %. Термообработка шихты заключалась в нагреве шихты углекислым газом от 20 до 900 °С со скоростью 100 °С/мин в течение 8 мин. После выхода на заданный температурный режим шихта обжигалась в течение 5; 10 и 15 мин, что соответствует суммарной продолжительности термообработки 14; 19 и 24 мин, с последующим резким охлаждением обожженного материала в воде. Степень магнетизации обожженного материала, %, определена по следующей формуле [20, 23, 24]:

$$M = 2,33 \frac{\beta_{\text{FeO}}}{\beta_{\text{Fe}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где M – степень магнетизации, %; 2,33 – коэффициент пропорциональности; β_{FeO} – массовая доля закиси железа, %; β_{Fe} – массовая доля железа общего, %. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Анализ результатов исследований показал, что с увеличением продолжительности термообработки степень магнетизации шихты непрерывно возрастает. При этом увеличение массовой доли углерода твердого с 2,5 до 7,4 % (в 3 раза) для продолжительности термообработки 24 мин соответствует повышению степени магнетизации обожженной руды с 90 до 107,9 % (в 1,2 раза).

Получение степени магнетизации более 100 % при обжиге шихты с массовой долей углерода твердого 7,4 % свидетельствует о перевосстановлении в магнетите железа Fe^{3+} с образованием вюститита (FeO) [23]. Присутствие в обожженном материале вюститита негативно сказывается на последующих технологических показателях магнитного обогащения и выражается в повышенных потерях железа с отвальными хвостами из-за слабомагнитных свойств этого минерала.

Таблица 2. Зависимость показателей термообработки шихты в присутствии углерода твердого с массовой долей 2,5 % от продолжительности термообработки при температуре 900 °С

Table 2. Dependence between the charge thermal processing indicators in the presence of solid carbon with a mass fraction of 2.5% and its heat treatment duration at a temperature of 900 °С

Продолжительность термообработки, мин	Массовая доля, %		Степень магнетизации, %
	Fe	FeO	
0	46,5	0,48	2,41
14	52,1	17,0	76,03
24	57,6	19,4	78,48
34	57,9	23,0	92,56
44	57,0	23,1	94,51
54	56,0	23,7	98,61

Поскольку в промышленных условиях основная доля себестоимости термообработки руды в присутствии твердого углерода связана с углем, дальнейшие лабораторные исследования по магнетизации проведены при минимальной исследуемой массовой доле углерода твердого в шихте 2,5 %. Результаты опытов по влиянию продолжительности изотермической выдержки при температуре 900 °С на степень магнетизации обожженной руды представлены в табл. 2.

Результаты термообработки шихты с массовой долей углерода твердого 2,5 % показали, что с увеличением продолжительности термообработки с 0 до 54 мин степень магнетизации возрастает с 2,41 (исходная шихта) до 98,61 %.

Результаты термообработки при продолжительности 54 мин показали, что полученная степень магнетизации (98,61 %) не превышает 100 %, что означает отсутствие в обожженном материале вюститита.

Для наработки обожженной руды, полученной из шихты крупностью $-5,0+1,0$ мм с массовой долей углерода твердого 2,5 %, для последующих технологических исследований выбрана лабораторная вращающаяся трубочатая печь.

Таблица 3. Показатели магнитного обогащения обожженной руды
Table 3. Indicators of roasted ore magnetic concentration

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %	
		Fe	FeO	Fe	FeO
<i>-2+0 мм</i>					
Магнитный	77,37	60,50	22,71	93,06	96,58
Немагнитный	22,63	15,43	2,75	6,94	3,42
Исходный	100,00	50,30	18,19	100,00	100,00
<i>$\beta^{-71} = 53 \%$</i>					
Магнитный	72,44	63,20	23,70	91,02	95,07
Немагнитный	27,56	16,39	3,23	8,98	4,93
Исходный	100,00	50,30	18,06	100,00	100,00
<i>$\beta^{-71} = 74 \%$</i>					
Магнитный	72,11	63,30	23,90	90,75	95,13
Немагнитный	27,89	16,69	3,16	9,25	4,87
Исходный	100,00	50,30	18,12	100,00	100,00
<i>$\beta^{-71} = 90 \%$</i>					
Магнитный	70,26	63,00	23,86	88,00	92,41
Немагнитный	29,74	20,30	4,63	12,00	7,59
Исходный	100,00	50,30	18,14	100,00	100,00

В процессе обжига изотермическая выдержка шихты происходила в атмосфере монооксида углерода, полученного из углекислого газа, при температуре 900 °С. Охлаждение обожженного материала до температуры 300 °С осуществлялось в азоте с последующим резким охлаждением в воде.

Во вращающейся печи по описанному режиму термообработки для технологических исследований по обогащению наработана партия обожженной руды со средней степенью магнетизации 93 % и массовой долей железа 50–51 %.

Для изучения возможности получения из обожженной руды железного концентрата с массовой долей железа не менее 67 % в лабораторных условиях проведены технологические исследования с использованием магнитной сепарации обожженной руды, предварительно измельченной до различной крупности, в магнитном поле с напряженностью 88 кА/м. Результаты исследований приведены в табл. 3.

Результаты технологических исследований показали, что снижение крупности обожженной руды с $-2+0$ мм до 53 % кл. -71 мкм привело к увеличению массовой доли железа в магнитном продукте с 50,3 до 63,2 %. Дальнейшее снижение крупности обожженной руды привело не к увеличению массовой доли железа

в магнитном продукте, а к снижению его выхода с 72,96 до 70,05 % и извлечения в него железа с 91,23 до 87,89 % при соответствующем увеличении потерь железа с немагнитным продуктом с 8,77 до 12,11 %.

Для анализа причин отсутствия влияния снижения крупности обогащения на качество магнитных продуктов при массовой доле кл. –71 мкм более 53 % проведен минералогический анализ магнитного продукта, полученного при крупности 90 % кл. –71 мкм. Результаты анализа представлены на рис. 2.

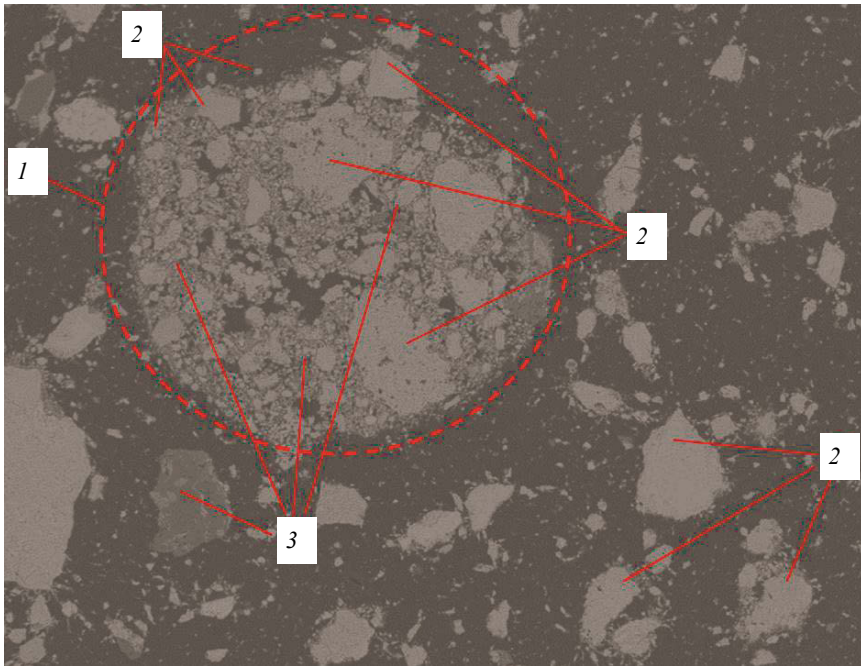


Рисунок 2. Результаты минералогического анализа:
1 – флоккула; 2 – зерна магнетита; 3 – зерна нерудных минералов
Figure 2. Results of mineralogical analysis:
1 – floccule; 2 – magnetite grains; 3 – grains of nonmetallic minerals

Результаты анализа показали, что в магнитном продукте кроме раскрытых зерен магнетита и его сростков присутствуют флоккулы, состоящие из раскрытых зерен магнетита и его сростков с породными минералами, имеющими различные текстуры вплоть до тонкой и весьма тонкой. Присутствие во флоккулах достаточно большого содержания зерен магнетита значительно повысило их магнитные свойства и сделало сильномагнитными.

Для исследований вещественного состава флоккул выборочно проведена электронная микроскопия отдельных зерен минералов, входящих в состав флоккул. На рис. 3 и в табл. 4 приведена карта аншлифа магнитного продукта с обозначением исследуемых участков зерен различных минералов и представлены вещественные составы этих участков.

Результаты анализа показали, что в участках «Спектр 34», «Спектр 38», «Спектр 40», «Спектр 45», «Спектр 46», «Спектр 47» и «Спектр 49», визуальнo относящихся к раскрытым зернам магнетита, массовая доля железа находится в диапазоне от 67,4 до 73,7 %. Полученные значения содержаний достаточно близки к максимально возможной массовой доле железа в магнетите 72,4 %. Превышение массовой доли железа в участке «Спектр 34» предельного значения содер-

жания железа в магнетите является следствием наличия достаточно высокой относительной погрешности применяемого метода.

Химический состав участка «Спектр 39» зерна, входящего в состав флокулы и визуально определенного при минералогическом анализе как породное, показал преимущественное содержание в нем кальция и кислорода (массовая доля 44,9 и 52,3 % соответственно) при минимальной массовой доле железа 2,4 %. При магнитном обогащении подобные бедные по железу породные зерна, входящие в состав сильномагнитных флокул, попадут в магнитный продукт и приведут к снижению качества железного концентрата. Флокулы, имеющие в своем составе недостаточное количество магнетита для придания им сильномагнитных свойств, перейдут в немагнитный продукт, увеличив потери железа с отвальными хвостами [23]. В такой ситуации разделение материала по магнитным свойствам не позволит получить кондиционный по железу концентрат.

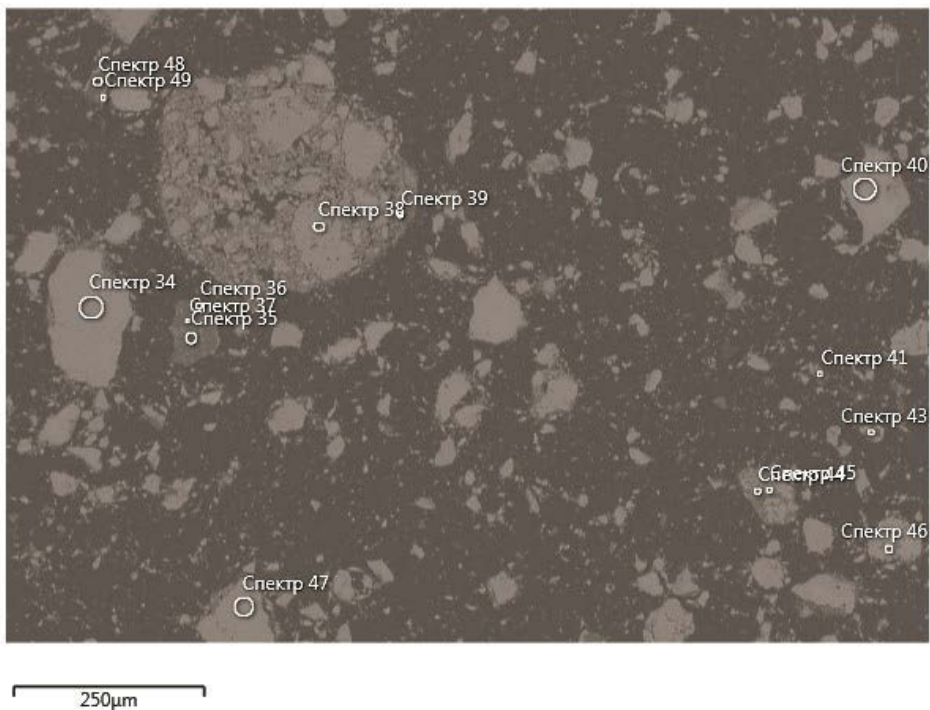


Рисунок 3. Карта исследуемых участков зерен шлифа магнитного продукта
Figure 3. Map of the studied areas of magnetic product polished section grains

Для получения более высоких показателей обогащения обожженных руд в схемах обогащения вместе с мокрой магнитной сепарацией применяется несколько стадий дешламации [23]. Для перехода в слив дешламации крупных флокул необходимая скорость восходящего потока в рабочей зоне дешламатора должна быть достаточно высокой, что дополнительно приведет к неизбежному попаданию в слив мелких зерен магнетита и, как следствие, к увеличению потерь железа с отвальными хвостами.

С целью повышения качества магнитного продукта измельченная обожженная руда перед магнитной сепарацией подвергнута дешламации. В результате исследований при крупности обогащения 98 % кл. –71 мкм получен железный концентрат с массовой долей железа 67,2 % [25].

Из железного концентрата с массовой долей железа и закиси железа 67,2 и 26,0 % соответственно в лабораторном окомкователе при использовании комбинированной связующей добавки, состоящей из 0,7 % бентонита и 0,4 % карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), получены прочные сырые и сухие окатыши. Влажность гранул составила 15–16 %.

Таблица 4. Вещественный состав областей зерен в магнитном продукте
Table 4. Material composition of grain regions in a magnetic product

Анализируемый участок	Массовая доля, %							
	Fe	O	Ca	Si	Mn	Mg	F	P
Спектр 34	73,7	26,1	0,2	–	–	–	–	–
Спектр 35	–	51,7	0,2	–	–	–	–	–
Спектр 36	1,2	53,4	45,3	–	–	–	–	–
Спектр 37	–	37,4	38,1	–	–	–	4,0	18,8
Спектр 38	72,6	25,2	–	1,0	0,6	–	–	–
Спектр 39	2,4	52,3	44,9	0,1	–	0,2	–	–
Спектр 40	68,6	27,1	0,3	2,1	1,8	–	–	–
Спектр 41	1,3	53,4	44,7	–	–	0,6	–	–
Спектр 43	2,8	52,7	44,4	–	–	–	–	–
Спектр 44	1,6	52,6	45,5	–	–	0,3	–	–
Спектр 45	67,4	25,9	1,7	0,4	4,6	–	–	–
Спектр 46	71,7	26,8	0,3	1,0	–	–	–	–
Спектр 47	71,4	26,2	–	1,2	1,2	–	–	–
Спектр 48	0,9	51,4	–	47,7	–	–	–	–
Спектр 49	69,4	26,5	0,4	1,7	1,3	0,5	–	–

«–» – ниже предела обнаружения.

Исследования процессов окисления и последующей высокотемпературной термообработки окатышей проведены на полностью высушенных гранулах. Опыты по окислению окатышей произведены в печи Таммана по описанной методике.

Для получения прочных обожженных окатышей необходимо наиболее полное их окисление перед высокотемпературным обжигом. Оптимальная температура окисления природных магнетитовых окатышей, как правило, составляет от 900 до 1050 °С. При этом окисление магнетита протекает в условиях начинающегося процесса спекания окатышей, которое носит зональный характер и приводит к уменьшению их общей пористости.

В текущей работе сухие окатыши, которые после удаления влаги имели повышенную пористость, были окислены в токе воздуха в диапазоне температуры от 600 до 1000 °С в течение фиксированной продолжительности. В быстро нагретых (200 °С/мин) и быстро охлажденных (200 °С/мин) гранулах определена массовая доля железа и закиси железа. Результаты исследований по кинетике окисления окатышей представлены в табл. 5.

Из анализа результатов следует, что окисление окатышей, полученных из железного концентрата, происходит достаточно быстро даже при температурах подогрева от 600 до 800 °С за счет повышенной пористости сухих гранул.

Для дальнейшей металлизации окисленных окатышей во вращающейся печи их прочность на сжатие должна составлять не менее 200 кг/ок. Для определения

прочностных характеристик окисленных окатышей проведены исследования по оценке влияния продолжительности спекания окатышей и температуры обжига на их прочность при начальной температуре 900 °С. Результаты исследований представлены в табл. 6.

Таблица 5. Влияние температуры и продолжительности изотермической выдержки окатышей на процесс их окисления в зависимости от массовой доли закиси железа

Table 5. Influence of pellets isothermal holding temperature and duration on their oxidation depending on iron oxide mass fraction

Температура окисления, °С	Продолжительность окисления, мин	Массовая доля, %	
		Fe	FeO
600	1	65,0	0,49
800	2	64,8	0,23
1000	2	64,8	0,23
1000	3	65,2	0,23
1000	6	64,9	0,23

Результаты исследований показали, что прочность окисленных окатышей в основном увеличивается за счет повышения температуры обжига. Максимальная прочность окатышей составила 236 кг/ок. при температуре 1325 °С. Снижение прочности гранул, обожженных при температуре 1350 °С, связано с развитием процесса диссоциации гематита до магнетита и с последующим его окислением при охлаждении. Таким образом, в промышленных условиях для получения окисленных окатышей с прочностью не менее 200 кг/ок. из железного концентрата, полученного после обжиг-магнитного обогащения, необходимо использовать установку *решетка-трубчатая печь* с температурой обжига 1325 °С.

Таблица 6. Влияние температурно-временных параметров спекания окатышей на их прочностные характеристики и химический состав

Table 6. Influence of pellet sintering temperature-time parameters on their strength characteristics and chemical composition

Температура обжига, °С	Продолжительность спекания с 900 °С до температуры обжига, мин	Прочность окатышей, кг/ок.	Массовая доля, %	
			Fe	FeO
1250	12	158	64,7	0,38
1250	17	152	64,9	0,23
1300	18	167	65,4	1,42
1300	18	185	65,3	0,15
1325	14	236	64,9	0,22
1350	15	151	65,1	1,09
1350	16	139	64,6	2,41

Заключение. Для окисленной железной руды месторождения Абаил разработан режим магнетизирующего обжига в крупности –5+3 мм в присутствии твердого углерода в виде угля для следующего режима работы вращающейся печи: нагрев до температуры 900 °С и изотермическая выдержка в атмосфере монооксида углерода; охлаждение до температуры 300 °С в атмосфере азота с последующей закалкой обожженной руды в воде. Разработанный режим позволил получить обожженный продукт со степенью магнетизации 93 %.

Уменьшение крупности обогащения в слабом магнитном поле обожженной руды месторождения Абаил не позволяет увеличить массовую долю железа в магнитном продукте более 63,2 %. Это связано с наличием в магнитных продуктах сильномагнитных флокул, состоящих из раскрытых зерен магнетита и его сростков с породными минералами.

Использование предварительной дешламации железного промпродукта позволяет удалить часть флокул в слив с получением железного концентрата с массовой долей железа 67,2 %.

Изучен процесс получения прочных сырых и обожженных окатышей из железного концентрата с массовой долей железа 67,2 %. Для получения обожженных окатышей с прочностью не менее 200 кг/ок. в промышленных условиях необходимо использовать установку *решетка-трубчатая печь* с температурой обжига 1325 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пелевин А. Е. Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем сепарации в переменном магнитном поле // Черные металлы. 2021. № 5. С. 4–9.
2. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Применение тонкого гидравлического грохочения для стадийного выделения титаномагнетитового концентрата // Обогащение руд. 2021. № 1. С. 8–14.
3. Пелевин А. Е. Получение гематитового концентрата из гематит-магнетитовых руд // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 422–430.
4. Прокопьев С. А., Пелевин А. Е., Напольских С. А., Гельбинг Р. А. Стадийное выделение магнетитового концентрата с использованием винтовой сепарации // Обогащение руд. 2018. № 4. С. 28–33.
5. Опалев А. С. Повышение качества магнетитовых концентратов на основе магнитно-гравитационной сепарации // Горный журнал. 2020. № 9. С. 72–77.
6. Panda L., Biswal S. K., Venugopal R., Mandre N. R. Recovery of ultra-fine iron ore from iron ore tailings // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2018. Vol. 71. No. 2. P. 463–468.
7. Sadeghi M., Bazin C., Renaud M. Radial distribution of iron oxide and silica particles in the reject flow of a spiral concentrator // International Journal of Mineral Processing. 2016. Vol. 153. P. 51–59.
8. Idres A., Bounouala M., Benselhoub A., Bouhedja A. New method of electrostatic separation of the oxidized iron ore // Mining Science. 2016. Vol. 23. P. 33–42.
9. Stupnik M. I., Morkun V. S., Oliinyk T. A., Peregodov V. V., Korolenko M. K. Development of concentration technology for medium-impregnated hematite quartzite of Kryvyi Rih iron ore basin // Science and Innovation. 2021. Vol. 16. No. 6. P. 56–71.
10. Sharkovsky D. O., Gubin S. L., Ignatova T. V., Levshin A. V. Collecting agents for flotation upgrade of Mikhailovsky gok's magnetite iron ore concentrate // IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress Proceedings. 2019. P. 2141–2152.
11. Avdokhin V. M., Gubin S. L. Production of high-grade iron-ore concentrates in column-type flotation cells at Mikhailovsky gok // IMPC 2006 – 23rd International Mineral Processing Congress Proceedings. 2006. P. 1935–1939.
12. Stafeev A. A. Iron-ore enrichment by magnetic hydroseparation // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 10. P. 823–825.
13. Козин В. З., Комлев А. С., Волков П. С. Эффективность использования операций обогащения в схемах подготовки проб // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 3. С. 3–12.
14. Прокопьев С. А., Пелевин А. Е., Прокопьев Е. С., Иванова К. К. Повышение комплексности использования железорудного сырья с помощью винтовой сепарации // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 70–80.
15. Юсфин Ю. С. Металлургия железа. М.: Академкнига, 2007. 464 с.
16. Железородная база России / под ред. В. П. Орлова, М. И. Беригина, Н. И. Головкина. М.: Геоинформация, 1998. 842 с.
17. Мухтар А. А., Момынбеков А. Д., Нускабеков Ж. С., Коровушкин В. В. Обжигмагнитное обогащение бурожелезняковой руды Абаильского месторождения // Обогащение руд. 2015. № 4. С. 13–16.
18. Мухтар А. А., Мухымбекова М. К., Макашев А. С., Нускабеков Ж. С., Момынбеков А. Д., Касимова Б. К. Обжигмагнитное обогащение лимонитизированной руды месторождения Кок-Булак // ГИАБ. 2015. № 10. С. 88–93.
19. Мухтар А. А., Мухымбекова М. К., Нускабеков Ж. С., Макашев А. С., Коровушкин В. В. Исследование влияния термической обработки бурожелезняковой руды Абаильского месторождения на качество получаемых продуктов // ГИАБ. 2015. № 4. С. 129–133.
20. Мухтар А. А., Мухымбекова М. К., Макашев А. С., Нускабеков Ж. С., Момынбеков А. Д., Касимова Б. К. Обжигмагнитное обогащение бурожелезняковой руды Абаильского месторождения // ГИАБ. 2015. № 10. С. 113–117.

21. Дмитриева Е. Г., Газалева Г. И., Братыгин Е. В., Власов И. А. Особенности вещественного состава и термических свойств окисленных железных руд месторождения Абаил // Горный журнал. 2019. № 9. С. 15–20.
22. Справочник по обогащению руд. Обоганительные фабрики / под ред. О. С. Богданова, Ю. Ф. Ненарокова. М.: Недра, 1984. 358 с.
23. Шинкоренко С. Ф., Белецкий Е. П. Справочник по обогащению руд черных металлов. М.: Недра, 1980. 527 с.
24. Кармазин В. И., Губин В. И., Юров П. П. Обжигмагнитное обогащение железных руд. М.: Недра, 1969. 168 с.
25. Тациенко П. А. Подготовка труднообогатимых железных руд. М.: Недра, 1979. 208 с.

Поступила в редакцию 6 сентября 2021 года

Сведения об авторах:

Лопатин Юрий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории окискования и физико-механических испытаний отдела рудоподготовки и специальных методов исследований научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр».

Мушкетов Антон Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд черных металлов отдела рудоподготовки и специальных методов исследований научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр», доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Технического университета УГМК. E-mail: maas@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9542-6474>

Дмитриева Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории окискования и физико-механических испытаний отдела рудоподготовки и специальных методов исследований научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5636-4263>

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-55-68

Integrated study on obtaining oxide pellets from brown iron ore

Iurii N. Lopatin¹, Anton A. Mushketov^{1,2}, Elena G. Dmitrieva¹

¹ JSC Uralmexhanobr (Scientific-Research and Design Institute), Ekaterinburg, Russia.

² Technical University of UMMC, Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, Russia.

Abstract

Introduction. Currently, the main raw materials for the production of cast iron and steel at metallurgical plants are iron concentrates obtained from magnetite (ferrous) quartzites, titanium-magnetite, and skarn ores. The existing technologies for processing these types of ores, which mainly include separation processes based on magnetic properties, size, separating of equally falling grains, and surface wettability allow us to produce both ordinary iron concentrates and high quality ones. The use of such schemes in the processing of brown iron ore does not allow obtaining high rates of mineral concentration. One of the methods for processing this type of ore is a roasting-magnetic scheme, which allows converting weakly magnetic (non-magnetic) forms of iron into strongly magnetic ones.

Research objective is to develop the mode of magnetizing roasting of brown iron ore, technology of concentrating of the burn-out product in order to obtain iron concentrate and oxide pellets.

Methods of research. The duration of heat treatment of the charge consisting of iron ore from the Abail deposit and coal from the Ekibastuz deposit and the required mass fraction of solid carbon contained in the coal are determined. Technological studies of the roasted product were carried out in order to obtain a concentrate with a mass fraction of iron at least 67%. According to the developed technology, a batch of iron concentrate was developed in order to obtain and study raw and oxide pellets.

Results. The modes of magnetizing roasting of brown iron ore from the Abail deposit and cooling of the roasted material have been developed. A scheme for mineral processing of the roasted material has been developed in order to obtain a concentrate with at least 67% of iron mass fraction. The process of obtaining strong raw and roasted pellets from iron concentrate is studied.

Conclusions. The developed mode of magnetizing roasting of the charge consisting of coal and ore from the Abail deposit makes it possible to obtain a roasted product with a degree of magnetization of 93%. The using of desliming of the roasted product makes it possible to remove magnetic floccules from the processing that reduce the concentrate quality, and to obtain a concentrate with a mass fraction of iron of at least 67% in the last stage of magnetic separation. From the iron concentrate, it is possible to obtain oxidized pellets with a strength of at least 200 kg/pellet at temperature of pellets firing of 1325 °C.

Keywords: magnetizing roasting; iron concentrate; oxidized iron ore; goethite and hydrogoethite; pellets; degree of magnetization; wet magnetic separation; desliming.

REFERENCES

1. Pelevin A. E. Increasing the efficiency of iron-ore dressing by separation in an alternative magnetic field. *Chernye metally = Ferrous Metals Journal*. 2021; 5: 4–9. (In Russ.)
2. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Fine hydraulic screening for staged separation of titanium-magnetite concentrate. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2021; 1: 8–14. (In Russ.)
3. Pelevin A. E. Production of hematite concentrate from hematite-magnetite ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 3-1: 422–430. (In Russ.)
4. Prokopiev S. A., Pelevin A. E., Napolskikh S. A., Gelbing R. A. Staged screw separation of magnetite concentrate. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2018; 4: 28–33. (In Russ.)
5. Opalev A. S. Improving quality of magnetite concentrates based on magnetic-gravity separation. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2020; 9: 72–77. (In Russ.)
6. Panda L., Biswal S. K., Venugopal R., Mandre N. R. Recovery of ultra-fine iron ore from iron ore tailings. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018; 71(2): 463–468.
7. Sadeghi M., Bazin C., Renaud M. Radial distribution of iron oxide and silica particles in the reject flow of a spiral concentrator. *International Journal of Mineral Processing*. 2016; 153: 51–59.
8. Idres A., Bounouala M., Benselhoub A., Bouhedja A. New method of electrostatic separation of the oxidized iron ore. *Mining Science*. 2016; 23: 33–42.
9. Stupnik M. I., Morkun V. S., Oliinyk T. A., Peregodov V. V., Korolenko M. K. Development of concentration technology for medium-impregnated hematite quartzite of Kryvyi Rih iron ore basin. *Science and Innovation*. 2021; 16(6): 56–71.
10. Sharkovsky D. O., Gubin S. L., Ignatova T. V., Levshin A. V. Collecting agents for flotation upgrade of Mikhailovsky gok's magnetite iron ore concentrate. In: *IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress Proceedings*. 2019. P. 2141–2152.
11. Avdokhin V. M., Gubin S. L. Production of high-grade iron-ore concentrates in column-type flotation cells at Mikhailovsky gok. In: *IMPC 2006 – 23rd International Mineral Processing Congress Proceedings*. 2006. P. 1935–1939.
12. Stafeev A. A. Iron-ore enrichment by magnetic hydroseparation. *Steel in Translation*. 2011; 41(10): 823–825.
13. Kozin V. Z., Komlev A. S., Volkov P. S. Concentration operations efficiency in the schemes of samples preparation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 3: 3–12. (In Russ.)
14. Prokopiev S. A., Pelevin A. E., Prokopiev E. S., Ivanova K. K. Increasing the integrity of iron-ore raw material use with the help of screw separation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 6: 70–80. (In Russ.)
15. Iusfin Iu. S. *Metallurgy of iron*. Moscow: Akademkniga Publishing; 2007. (In Russ.)
16. Orlov V. P., Berigin M. I., Golovkin N. I. (eds.) *Iron ore resources of Russia*. Moscow: Geoinformatsiia Publishing; 1998. (In Russ.)
17. Mukhtar A. A., Momynbekov A. D., Nuskabekov Zh. S., Korovushkin V. V. The Abailskoye deposit brown iron ore roasting-magnetic processing. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2015; 4: 13–16. (In Russ.)
18. Mukhtar A. A., Mukhymbekova M. K., Makashev A. S., Nuskabekov Zh. S., Momynbekov A. D., Kasymova B. K. Magnetic roasting enrichment of Coc-Bulak deposit limonite ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 10: 88–93. (In Russ.)
19. Mukhtar A. A., Mukhymbekova M. K., Nuskabekov Zh. S., Makashev A. S., Korovushkin V. V. Influence of heat treatment of Abail ironstone ore on final product quality. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 4: 129–133. (In Russ.)
20. Mukhtar A. A., Mukhymbekova M. K., Makashev A. S., Nuskabekov Zh. S., Momynbekov A. D., Kasymova B. K. Magnetic roasting enrichment of Abail deposit limonite ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 10: 113–117. (In Russ.)
21. Dmitrieva E. G., Gazaleeva G. I., Bratygin E. V., Vlasov I. A. Features of material constitution and thermal properties of oxidized iron ore at the Abail deposit in the Republic of Kazakhstan. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2019; 9: 15–20. (In Russ.)
22. Bogdanov O. S., Nenarokomov Iu. F. (eds.) *Reference book on mineral processing. Processing plants*. 2nd edition. Moscow: Nedra Publishing; 1984. (In Russ.)
23. Shinkorenko S. F., Beletskii E. P. *Reference book on ferrous metal ore processing*. 2nd edition. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)
24. Karmazin V. I., Gubin V. I., Iurov P. P. *Iron ore roasting-magnetic processing*. Moscow: Nedra Publishing; 1969. (In Russ.)
25. Tatsienko P. A. *Refractory iron ore preparation*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)

Information about authors:

Iurii N. Lopatin – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Pitting and Physical and Mechanical Testing, Department of Ore Preparation and Special Research Methods, JSC Uralkhrom. **Anton A. Mushketov** – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Ferrous Ore Concentration, Department of Ore Preparation and Research Special Methods, JSC Uralkhrom, associate professor of the Department of Mineral Processing, Technical University of UMMC. E-mail: maas@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9542-6474>

Elena G. Dmitrieva – PhD (Engineering), leading researcher, Laboratory of Pitting and Physical and Mechanical Testing, Department of Ore Preparation and Special Research Methods, JSC Uralkhrom. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5636-4263>

Для цитирования: Лопатин Ю. Н., Мушкетов А. А., Дмитриева Е. Г. Комплексные исследования по получению окисленных окатышей из бурожелезняковой руды // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 7. С. 55–68. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-55-68

For citation: Lopatin Iu. N., Mushketov A. A., Dmitrieva E. G. Integrated study on obtaining oxide pellets from brown iron ore. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 7: 55–68 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-55-68