

УДК 669.292.3: 669.054.82

Панишев Н.В., Бигеев В.А., Дудчук И.А.

## ОПЫТ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ШПАТОВЫХ ЖЕЛЕЗНЯКОВ БАКАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Аннотация.** Запасы шпатовых железняков Бакальского месторождения составляют около 1 млрд т. Высокое содержание MgO накладывает ограничение по объему вовлечения этого сырья в доменную плавку из-за образования малоподвижных шлаков, ухудшающих ход доменного процесса. Наиболее перспективными технологиями переработки бакальского сырья являются процессы Ромелт, ГТмкз, а также углекислотное выщелачивание сырья в процессе обогащения.

**Ключевые слова:** сидерит, оксид магния, доменная печь, ГТмкз, гранулированный чугун

В России, являющейся нетто-экспортером железорудного сырья (ЖРС), в благоприятных условиях работают металлургические предприятия, расположенные в центральных регионах. В сложном положении находятся предприятия Южного Урала. В ОАО «ММК», производящим 20% металла в стране, доля металла, выплавляемого из местного ЖРС, не превышает 25%.

Уральский федеральный округ (УрФО) обеспечивает в России добычу 25% железных руд и 97% ванадия. В УрФО на Госбалансе учтено 50 железорудных месторождений, из которых 23 разрабатываются и 27 находятся в Госрезерве. Госбалансом в УрФО учтены лишь месторождения пяти промышленных типов руд: титаномагнетитовые, шпатовые железняки, магнитные и бурье железняки и железистые кварциты. Урал располагает крупными (около 15 млрд т) балансовыми запасами и значительными прогнозными ресурсами железных руд. Главенствующая роль по запасам (80,5%) и добыче (86,3%) принадлежат титаномагнетитовым рудам в объеме 45 млн т/г (Качканарское месторождение и месторождение г. Малый Куйбас). Остальные руды представлены шпатовыми (руды Бакальской группы) и магнитными железняками [1,2].

Уместно отметить сложившуюся диспропорцию между производственными мощностями по добыче и переработке сырья в УрФО. Мощности по добыче отстают от мощностей по переработке в соотношении 1:2,7.

В сложившейся ситуации становится актуальной проблема вовлечения в металлургический передел первородного, но «неудобного» для традиционной технологии ЖРС. В Челябинской области Государственным балансом учтены месторождения комплексных труднообогатимых железосодержащих руд с общим запасом 1,5 млрд т по категориям А+В+C1+C2, преимущественно представленных шпатовыми железняками Бакальской и Ахтенской групп (около 1,0 млрд т).

Остальные рассредоточенные месторождения представлены залежами титаномагнетитовых и магнетитовых руд мощностью до 50 млн т.

Общая добыча железных руд в Челябинской области составляет около 6 млн т/г.

### Запасы железных руд Бакальской группы

Из общих запасов в объеме 998,206 млн т на балансе ООО «БРУ» числится 6 месторождений с запасами на 01.01.06 по категориям В+C1- 427,8 млн т, в том числе бурых железняков-13,98 млн т и сидеритов-413,8 млн т, а

также кварцитов с балансовыми запасами по категориям В+C1-78 млн т (табл.1)

Месторождение Бакальской группы представлено сидеритовыми рудами, приуроченными к осадочным комплексам верхнего протерозоя. Залежи имеют пластообразную форму и достаточно большие размеры.

Верхние части залежей сидеритов окислены и превращены в бурые железняки с Fe=45-52%. В настоящее время бурые железняки почти полностью отработаны.

Кроме залежей железной руды, месторождение характеризуется значительными запасами кварцитов, пригодных к использованию в производстве ферросплавов и оgneупоров, а также известняка высокого качества с поверхностным залеганием.

### Характеристика железных руд Бакальской группы

Основная масса сидеритовых руд содержит %: Fe 28-32; MgO 8-10; MnO 1,8-2,0 и потерь при прокаливании 33-35 (табл. 2). Последние удаляются после нагрева в интервале температур 600-900° в виде углекислого газа.

Из таблицы следует, что шахтная руда содержит существенно меньше железа (на 4%) из-за загрязнения алюмосиликатными сланцами. Меньшая доля основного минерала сидероплезита определяет сокращение доли в шахтной руды его составляющих: закиси железа, оксида магния и потерь при прокаливании.

К положительным сторонам использования ЖРС Бакальского месторождения следует отнести:

- большие разведанные запасы сидеритовых руд;
- наличие в рудах полезной примеси марганца (до 1,4%);
- низкое содержание вредных примесей (S,P);
- наличие необходимой инфраструктуры и трудовых ресурсов, а также благоприятное географическое расположение месторождения (низкие затраты на доставку сырья потребителям).

Использование бакальских руд по традиционной технологии сдерживается следующими недостатками:

- низкое содержание железа в рудах 28-32,5 %;
- высокое содержание MgO 8-10 %;
- высокие потери при прокаливании (более 33 %, вызывающие повышенный расход топлива на их удаление);
- сложные и затратные и схемы обогащения руды;
- рассредоточение рудных залежей;
- глубокое залегание руд (до 600м), требующее подземного способа их отработки.

Основным рудообразующим минералом бакальских сидеритовых руд на 80-97% является карбонат железа переменного состава, включающий сидероплезит и пи-

© Панишев Н.В., Бигеев В.А., Дудчук И.А., 2017

**Раздел 1**

стомезит, представляющие изоморфную смесь карбоната железа, магния, марганца и, частично, кальция [3].

Разделение этих компонентов на базе существующей в ООО «Бакальское рудоуправление» (БРУ) схемы переработки сидеритовых руд без структурного разрушения общей кристаллической решетки принципиально невозможно.

Оставшаяся часть представлена сланцами (3-12,7%), доломитами (2,7-32,9%), углистыми и глинистыми

ми сланцами (1,5-5,0%), пиритом (0,1-2,0%), баритом (0-3,5%), серицом и диабазами (0-6,0%), анкеритом (0-5,0%) и пр.

Статистика распределения проб эксплуатационной разведки 2006 года в шахте «Сидеритовая» по классам содержания железа свидетельствует о присутствии некондиционных и пустых прослоев в составе рудных тел (табл.3).

Таблица 1

Запасы ЖРС Бакальской группы

Месторождение, тип руды	Запасы, тыс. т			Содержание Fe, %	Всего, тыс. т
	A+B+C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	Забалансовые		
Находятся на балансе ООО «Бакальское рудоуправление», разрабатываемые					
Разрабатываемые:					
бур. железняки	388 311	110 436	24 909	30,71	498 747
сидериты	332	16	0	45,21	348
	387 979	110 420	24 909	30,70	498 399
Находятся на балансе ООО «Бакальское рудоуправление», временно законсервированные					
Законсервированные					
бур. железняки	39 154	5 558	8 940	35,09	44 712
сидериты	13 645	1 018	0	44,39	14 663
	25 509	4 540	8 950	30,80	30 049
Итого по ООО «БРУ»					
бур. железняки	427 465	115 994	33 859	31,15	543 459
сидериты	13 977	1 034	0	44,41	15 011
	413 488	114 960	33 859	30,70	528 448
Находятся на балансе ОАО «Бакальские рудники», временно законосервированные					
ИТОГО (законсервированные)					
бур. железняки	12 950	2 456	8 896	39,80	15 406
сидериты	11 638	1 881	7 740	40,71	13 519
	1 312	575	1 156	32,90	1 887
Всего (БРУ+БР)					
бур. железняки	440 415	118 450	42 755	31,29	558 865
сидериты	25 615	2 915	7 740	42,73	28 530
	414 800	115 535	35 015	30,71	530 335
Государственный резерв					
Итого					
бур. железняки	195 381	243 960	0	31,97	439 341
сидериты	5 780			41,87	5 780
	189 601	243 960		31,71	433 561
Всего по Бакалу					
бур. железняки	635 796	362 410	42 755	31,49	998 206
сидериты	31 395	2 915	7 740	42,57	34 310
	604 401	359 495	35 015	31,02	963 896

Таблица 2

Средний химический состав карьерной и шахтной сидеритовой руды

Вид руды	Содержание, %							
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	S	ППП
Сидерит карьерной руды	32,0	38,0	3,5	5,0	3,0	10,5	0,4	36,5
Сидерит шахтной добычи	28,2	34,0	2,05	10,0	5,0	9,0	0,4	34,0

Таблица 3

Распределение проб шахтной сидеритовой руды по содержанию железа

Всего проб	Количество проб в классе с содержанием железа, %					
	более 35	более 30	более 25	более 20	более 15	менее 15
296	29	70	78	19	8	92
Выход класса	9,8%	23,6%	26,4%	6,4%	2,7%	31,1%

Таблица 4

## Распределение рудных и нерудных минералов в сидеритовой руде Бакальского месторождения

Рудные		Нерудные	
Состав	%	Состав	%
Сидероплэзит	74,50	Доломит	2,00
Гематит и гидрогематит	5,00	Барит	0,03
Магнетит	1,10	Кварц	4,00
Пирит	0,60	Каолин	1,50
		Силикаты и алюмосиликаты	11,27
Всего	81,20	Всего	18,80

Таблица 5

Распределение минералов в изоморфном ряду  $\text{FeCO}_3 + \text{MgCO}_3$ 

Наименование минералов	Среднее содержание, %		Пределы содержания, %
	$\text{FeCO}_3$	$\text{MgCO}_3$	
Сидерит	100	100	-
Сидероплэзит	70 ± 95	70 ± 95	30 ± 5
Пистомезит	50 ± 70	50 ± 70	50 ± 30
Мезизит	30 ± 50	30 ± 50	70 ± 50
Брейнерит	30	30	70

Сидеритовые руды Бакальского месторождения в основном состоят из сидероплэзита с содержанием  $\text{FeCO}_3$  от 66,9 до 79,9%. При этом при исходном содержании в руде железа 30,27% (в чистом сидерите содержание железа составляет 48,28%) рудных минералов содержится 81,2% (табл.4).

Наличие в рудах оксидов кальция и кремнезема свидетельствует об их биминеральном составе.

Установлено, что при дроблении руды до фракции 0-50 мм оптимальное раскрытие сидероплэзита отрудовмещающих пород происходит в классе 6-12мм, т.е. предварительное механическое обогащение карбонатных руд, добываемых шахтой «Сидеритовой», теоретически возможно. Так, в 1979г. институт «Уралгипроруда» составил ТЭО, которым доказывалась экономическая целесообразность обогащения сидеритов в тяжелых суспензиях. Мощность фабрики обогащения была определена в 4,0 млн т по сырой руде.

Низкое содержание Fe и высокое содержание MgO накладывает ограничение по объему вовлечения в металлургический передел сидеритов, поскольку без других мероприятий высокое содержание магнезии приводит к получению «коротких» шлаков (резко теряющих подвижность с понижением температуры) с ухудшением технологии отработки жидких продуктов доменной плавки и процессов обессеривания.

Отмеченные факторы ограничивают использование такого сырья и, например, позволяют покрыть потребности ОАО «ММК» по балансу железа лишь на 6,3 %. Как показывает практика, в настоящее время доменный цех может перерабатывать без нарушения шлакового режима до 50 тыс. т/мес. бакальского сырья в составе агломерата.

Дальнейшее увеличение объема бакальского ЖРС сопровождается повышением расхода марганцевого сырья и кварцита (для снижения содержания магнезии в шлаке и снижения его вязкости) и соответственно увеличением удельного расхода кокса и потерей производительности доменных печей.

Основным железорудным минералом этой руды является изоморфная смесь карбонатов железа, магния марганца и кальция, которые встречаются в различном количественном соотношении.

В зависимости от содержания молекулы  $\text{FeCO}_3$  в изоморфном ряду  $\text{FeCO}_3 + \text{Mg CO}_3$  выделяют следующие минералы (А.Г. Бетехтин) (табл.5).

Фазово-химический анализ бакальских сидеритов показал, что основным минералом является сидероплэзит, содержащий 27-37% железа; 8-9% магния; 1-1,6% марганца; примеси кальция; алюминия; кремния и других элементов.

Таким образом, под «сидеритовой рудой» принято считать карбонатные породы с содержанием железа более 20%, но железосодержащий минерал представлен не сидеритом (состоящим из карбоната железа), а изоморфной смесью с различным содержанием в ней карбонатного железа, магния и марганца. Железосодержащие карбонаты составляют около 70 - 90%, а нерудные 30 - 10 %. Последние представлены преимущественно сопутствующими породами, такими как доломиты, аргиллитовые и филлитовые сланцы, кварциты и диабазы. Из нерудных минералов присутствуют кварц, анкерит, пирит, а в баритизированных рудах – барит и другие минералы.

Структура сидерита по величине слагающих зерен равномерно - или неравномерно-зернистая от тонко до крупнозернистой. Форма у зерен неправильная, близкая к изометрической.

По величине зёрен среди сидеритов выделяют следующие типы структур:

Грубозернистая с величиной зёрен - более 1мм

Крупнозернистая с величиной зёрен - от 0,5 до 1,0мм

Среднезернистая с величиной зёрен - от 0,25 до 0,5мм

Мелкозернистая с величиной зёрен - от 0,25 до 0,05мм

По окраске среди сидеритовых руд наблюдаются однородно - и неоднородно окрашенные разности. Первые сложены только зёrnами серого или преимущественно сепо-жёлтого, горохового цвета. Более светло окрашенные разности сидеритов являются менее распространенными. Неоднородно окрашенные разности сидеритов являются преобладающими.

Текстура у сидеритовых руд и вмещающих карбонатных пород разнообразна. Выделяют типы: массивные; прожилковые, брекчевые, полосчатые, червячковые, фунтиковые (скорлуповатые), стилолитовые, пятнистые, гранулитовые.

По содержанию железа карбонатные руды Бакала принято делить на богатые и бедные. К богатым карбонатным рудам отнесены балансовые или кондиционные сидериты с содержанием железа более 25%, а к бедным – забалансовые или некондиционные сидериты с содержанием железа 20 + 25%, так называемые «железистые доломиты».

Особенность сидеритовой руды состоит в том, что включения нерудных составляющих разнообразны по форме (прожилковые, слоистые, гнёздообразные), размерам (от тысячных долей миллиметра до 300мм), что обуславливает различную раскрываемость сидероплезита при дроблении.

Верхний предел дробления, обеспечивающий раскрытие сидероплезита и нерудных включений колеблется в пределах от 50 до 3мм.

Оптимальное раскрытие сидероплезита в усреднённых рудах достигается дроблением до 12мм, хотя полное раскрытие происходит при тонком (-0,074 или – 0,044мм) измельчении.

В результате проведённых исследований обогатимости проб руд (Уралмеханобр), отобранных от разных месторождений или от отдельных участков одного месторождения, была выявлена их технологическая индивидуальность. В связи с этим сидеритовые руды подразделены на шесть генетических разновидностей, объединенных в три технологических типа:

- не нуждающиеся в механическом обогащении – богатые руды, пригодные для обогащения исключительно термическими методами;
- легкообогатимые – руды крупнослоистой текстуры с преобладанием крупных более 3 - 12мм включений сланцев, доломитов и других пород;
- труднообогатимые – руды тонкослоистой и массивной текстур с тонкими (менее 3мм) включениями нерудных, а также полуокисленные и баритизированные сидеритовые руды, содержащие наряду с карбонатными, окисленные минералы железа и барита.

Технологический тип объединяет руды, требующие одинаковых методов и схем обогащения.

Основная масса сидерита содержит 28-32% Fe, 8-10% MgO, 1,8-2,0% MnO и 33-35% потерь при прокаливании, которые выделяются в интервале температур 600-900°C в виде углекислого газа.

#### Производство товарной продукции в ООО «БРУ»

Обогащение бакальского сырья требует удаления химически связанного с железом и магнием углекислотного

аниона, механического отделения алюмосиликатов и магнеziальных соединений. Декарбонизация сидерита возможна только путем термической диссоциации карбонатов Fe, Mg, Ca и Mn, при которой в окислительной среде имеет место следующая последовательность реакций:



Учитывая, что массовая доля углекислоты, выделяющейся по реакциям (1), (3), (5), (6), составляет в сырье сидерите 33—35%, становится очевидным, что при ее полном удалении содержание железа поднимется с 30 до 44 - 46%. Минералогический анализ обожженного сидерита показал, что ферриты магния и марганца, образующиеся по реакциям (4) и (8), расположены в виде тончайших включений в кристаллах окиси железа, размер которых колеблется от 1 до 10 мкм. При такой структуре разделение оксидов Fe, Mg и Mn известными в настоящее время методами обогащения, исключая гидрометаллургические, не представляется возможным.

В то же время ферриты Mg и Mn являются магнитными фазами. Это позволяет использовать производительные магнитные сепараторы с обычной напряженностью магнитного поля H=1200—1300 эрст для отделения железомагнезиальных рудных тел от немагнитных алюмосиликатных и содержащих известь минералов в обожженном сидерите.

Отличительной особенностью бакальских сидеритов является то, что в ходе термообработки происходит изменение размера кусков. При нагреве со скоростью 10°C/мин в интервале температур 550—750 °C происходит интенсивное поглощение тепла, свидетельствующее о разложении комплексных карбонатов Fe и Mg по реакциям (1), (2), (3). При этом имеет место усадка образца, скорость которой достигает максимального значения при 700° после выделения основной массы углекислого газа и образования магнезиального феррита по реакции (4).

Кристаллохимический анализ показал, что в феррите Mg объем решетки, приходящийся на один атом железа, на 35—45% меньше, чем в соответствующем карбонате. Поэтому следует ожидать уменьшения линейных размеров кубика на 12—15%.

Экспериментальные исследования показывают, что усадка значительно меньше и не превышает 4%. Причиной диспропорции является низкотемпературный уровень разложения карбонатов железа и незавершенность кристаллических превращений из-за низкой скорости диффузии атомов. В результате скопления образующихся дефектов решетки пористость кусочков достигает 25—30% (объемных), и они снижают свою прочность по сравнению с сырой рудой в несколько раз. Более того, пористая структура КОС приводила к тому, что он при транспортировке разрушался значительно сильнее, чем подготовленные для доменной плавки окускованные материалы.

С 2005г. ООО «Бакальское рудоуправление» полностью переориентировано на получение товарной продукции из сидеритовой руды.

Сидеритовая руда открытых работ в железнодорожных думпиках поступает на ДСФ-1 и ДСФ-2. После

крупного и среднего дробления крупностью 0-60мм сортируется на фракции: 0-13 и 13-60мм.

Мелкая фракция является товарным продуктом – аглосидеритом (используется в качестве аглоруды). Крупная фракция направляется на обжиг в шахтные печи (при температуре 1150 °С) для получения КОС (концентраты обожженного сидерита). После охлаждения до 50°С в бункерах-охладителях обожжённый продукт сортируется на фракции 0-8 и 8-60мм.

Класс 8-60мм обожжённого сидерита поступает на магнитную сепарацию. Хвосты отправляются в карьеры в качестве подсыпочного материала.

Концентрат и фракция 0-8мм совместно подвергаются увлажнению в две стадии: до 2-3 и 6 % влаги, а затем сортируются на фракции 0-8(10) и +8(10)мм. Фракция +8(10)мм додрабатывается до 0-8(10)мм и в смеси с мелким классом, являясь товарной продукцией, усредняется до требований ТУ.

Сидерит шахты «Сидеритовая» подвергается крупному дроблению на щековой дробилке подземного дробильного комплекса и по наклонному стволу длиной 932м конвейерным транспортом выдаётся в здание приводной станции, откуда перегружается на конвейёры ДОФ. В корпусе среднего дробления грузопоток соединяется с сидеритами открытых работ.

Химический и минеральный состав сидеритовых руд свидетельствует о том, что они в сыром и обожжённом виде являются комплексным сырьем, которое служит не только источником железа, но и флюсом. Сказанное определяет направления их использования в металлургическом производстве.

### **Опыт использования ЖРС Бальского месторождения по аглодоменному маршруту**

Известны периоды работы доменных печей Саткинского (СМЗ) и Ашинского (АМЗ) металлургических заводов в начале 60-х годов прошлого века, когда в доменных печах проплавляли шихту, обеспечивающую получение шлака с содержанием магнезии выше 13-15% (до 20%) [4]. На ММК специально поднимали содержание магнезии в шлаке (за счет доломита) с целью улучшения обессернивающей способности шлака. Доменные печи СМЗ и АМЗ проплавляли исключительно сырье Бакальского месторождения. То есть эти печи работали на одном сырье с ровным химическим составом, что позволяло им устойчиво работать на шлаках с повышенным содержанием магнезии. В таких условиях повышенное содержание магнезии даже повышало текучесть шлака при содержании 10-12% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Таким образом, устойчивая работа доменных печей на шлаках с повышенным содержанием магнезии может быть организована проплавкой ЖРС с низкой колеблемостью по химическому составу в сочетании с ровной по тепловому состоянию работой печей.

Для обогащения сидерита непосредственно в месте его добычи на Бакальском рудоуправлении реализована обжиг-магнитная технология. Она включает дробление и сортировку руды с выделением кусковой фракции 20—80 мм и ее обжиг в шахтных печах. После термообработки этот материал дегазируется по реакциям (1), (3), (5) и (6) и приобретает магнитные свойства из-за образования магнезиального феррита по реакции (4). Это позволяет использовать магнитную сепарацию для отделения алюмосиликатных минералов. Химический состав железомагнезиального КОСа представлен в табл. 6. После его измельчения до агломерационной крупности 10—0 мм он

может использоваться в качестве рудной добавки к агломерационной шихте.

Помимо высокого приведённого содержания железа, КОС обладает дополнительными преимуществами, т.к. он содержит оксиды магния, необходимые для формирования доменного шлака с низкой вязкостью при использовании низкомагнезиальных агломератов и окатышей. Именно такая доменная шихта применялась в 2000 – 2009г. в ОАО «НТМК». В связи со сказанным первый опыт использования КОСа был в 2003г на ВГОКе, где производился агломерат для доменных печей НТМК.

Опытные партии магнезиальных агломератов ВГОКа проплавлялись на доменной печи N 5 НТМК совместно с окатышами Михайловского ГОКа. При постоянной их доле в шихте 30% замена обычного агломерата ВГОК на магнезиальный с КОС обеспечила снижение расхода кокса не менее чем на 10 кг/т чугуна.

Эффект достигнут за счет снижения газодинамического сопротивления столба шихты как в верхних горизонтах при уменьшении содержания мелочи 0 — 5мм, так и в нижних из-за наведения более жидкогоподвижных шлаков с оптимальным отношением MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, близким к единице. Установленный факт более высокой газопроницаемости столба доменной шихты дал возможность перейти к технологии выплавки передельного чугуна на НТМК с уменьшением доли окатышей в 2004 году до 20% и соответствующим увеличением расхода магнезиального агломерата с улучшенными металлургическими свойствами. Это позволило без снижения технико-экономических показателей доменной плавки получать на НТМК кондиционный передельный чугун и достичь существенного экономического эффекта за счет частичного вывода дорогих окатышей Михайловского и Костомушского ГОКов. Технологии производства и доменной плавки магнезиально-го агломерата с добавкой КОС внедрены на ВГОКе и НТМК. Ее использование в 2004 – 2009г. позволило обеспечить снижение расхода привозных окатышей, доля которых не превышала 10%.

В период мирового экономического кризиса, начиная с 2009г., доменные печи НТМК, выплавляющие передельный чугун, были остановлены, а агломерат на ВГОКе производился только из ванадиевых отходов. Объём его выпуска сократился в три раза по сравнению с тем, который был до кризиса. В 2009г. КОС не использовался. Однако в 2010г. для повышения качества агломерата ВГОК опять вернулся к поставкам КОСа и продолжает его использовать в настоящее время.

Успешное освоение технологии производства доменного агломерата с использованием КОСа на ВГОКе позволило применить её практически на всех крупных металлургических комбинатах Урала.

Особенностью агломерационного и доменного сырья ММК является преобладающая доля в нём концентрата и окатышей ССГПО (республика Казахстан), содержащих достаточно высокое количество оксида магния. В связи с этим содержание КОСа в агломерационной шихте ММК не должно превышать 5%. Специально проведённые испытания в 2006г. показали, что ввод в шихту агломерата даже 2% КОС вместо михайловской руды обеспечили прирост производительности машин на 1,5 – 2,0% и увеличение горячей и холодной прочности агломерата. Эффективность применения КОСа на ММК подтверждается тем, что начиная с 2006 г. КОС в количестве 50 тыс. т /мес. поставляется на ММК.

Таблица 6

## Усреднённый состав агломерационного концентрата обожжённого сидерита

Вид материала	Химический состав, масс. %								
	Feобщ.	FeO	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	ПМПП
Сырой сидерит	30 – 31	38 – 40	9 – 10	2,0 – 2,5	6,0 – 6,5	1,2 – 1,3	2,0 – 2,5	0,5 – 0,7	30,0 – 32,0
KOC	48 – 50	2,0 – 2,5	13 – 15	2,0 – 2,5	4,0 – 4,5	1,5 – 2,0	1,5 – 2,0	0,2 – 0,5	3,0 – 4,0

Промышленные испытания по производству агломерата с использованием 5 – 10% смеси KOCa с сырьем сидеритом проведены в июне - августе 2010 г. на новой агломерационной фабрике №2 Челябинского металлургического комбината. Сидерит вводился взамен михайловской руды, а основной составляющей шихты была смесь концентратов Михайловского и Высокогорского ГОКов. При неизменном качестве агломерата за счёт оптимизации состава доменного шлака по отношению Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO, приближающемуся к единице, достигнута экономия доменного кокса 3 – 5 кг/т чугуна. Вывод сырого сидерита из рудной смеси Бакала даст возможность улучшить качество агломерата и поднять производительность машин до уровня, достигнутого для михайловской руды с сохранением требуемой вязкости доменных шлаков.

В период мирового финансового кризиса оптимальная схема снабжения рудным сырьём ОАО «ЧМК» с поставкой преимущественно михайловской руды и концентрата была нарушена. Сокращение объёмов закупки коршуновского концентрата Китаем обусловило необходимость для холдинговой компании «МЕЧЕЛ», владеющей основными активами Коршуновского ГОКа и ЧМК, направить основную массу магниеводержащего коршуновского концентрата на ЧМК. Это исключило возможность использования магнезиального бакальского сырья в шихте агломерационной фабрики №2 ОАО «ЧМК» в 2011 г. Восстановление оптимального сырьевого баланса позволит заменить большую часть михайловской руды на KOC.

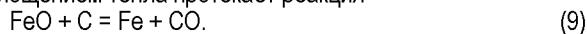
Таким образом, разработанная технология производства агломерационного концентрата обожжённого сидерита успешно применяется для производства агломератов из шихтовых материалов со сравнительно низким содержанием оксида магния (MgO = 1,5 – 2,5%). Это позволяет в условиях Уральского промышленного региона вовлечь в переработку до 100 000 т/год KOCa, что соответствует добыче 2,5 млн т руды в год.

В то же время имеющиеся запасы сидеритов позволяют существенно увеличить объём добываемой руды и снизить дефицит железа на Урале. Для того чтобы увеличить потребление продуктов переработки бакальских сидеритовых руд, разрабатывается технология восстановительного обжига сидеритов с получением низкомагнезиальных металлизированных продуктов.

#### Опыт использования сидеритового сырья в сталеплавильном производстве

В конвертерном процессе с высокой долей чугуна в металлошихте при начальном периоде продувки наблюдается раннее интенсивное обезуглероживание металлала, резко снижается содержание оксидов железа в шлаке, что, безусловно, объясняется слишком ранним повышением температуры ванны. Это затрудняет первичное шлакообразование в конвертере. Поэтому необходим дополнительный материал для одновременного охлаждения ванны, способствующий растворению извести и магнезиальных добавок, что позволит иметь шлаковый режим (состав, свойства и массу шлака), благоприятный для дефосфорации, сохранения футеровки, уменьшения выносов и выбросов из конвертера. Для этих целей хорошо подходит применение сидеритовой руды.

В процессе выплавки стали с применением сидеритовой руды, кроме эндотермических реакций (1) и (3), с поглощением тепла протекает реакция



За счет этих реакций можно обеспечить необходимые тепловой и шлаковый режимы сталеплавильных процессов.

Для количественной оценки влияния сидеритовой руды на технологические параметры выплавки стали в конвертере для условий ККЦ ОАО «ММК» были проведены расчеты по модернизированной математической модели, составленной на основе системы балансовых уравнений, которые решаются совместно методом итераций. Были определены охлаждающие эффекты различных материалов, которые использовались на плавку. 1 % сидерита от массы металлошихты снижает температуру металла на 37 °C, в то время как известняк – на 28 °C, сырой доломит – на 31 °C, ожелезненный доломит, лом и скрап (металлопродукт шлакопереработки) – на 14 °C. Поэтому как охладитель 1 т сидерита заменяет, например, 2,6 т металлического лома или 1,3 т известняка.

Порционная подача сырой сидеритовой руды одновременно с началом процесса продувки позволяет создать условия, способствующие шлакообразованию и нормализации температуры по всему объему ванны конвертера за счет активного разложения карбонатов. Это способствует приходу оксидов железа с последующим их взаимодействием с оксидом кальция шлакообразующих материалов, в результате чего образуются легкоплавкие комплексы (CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Ca<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Это позволяет уже после подачи первой порции руды получать активный жидкотекущий шлак, а также способствовать наибольшему усвоению других шлакообразующих присадок.

Технология позволяет увеличить стойкость футеровки за счет поступления оксидов магния из руды, повышающей их содержание в шлаке до уровня 10 – 12%, что уменьшает потребность в дополнительном использовании дорогостоящих магниеводержащих флюсов.

#### Перспективные технологии переработки шпатовых железняков Бакальского месторождения

В настоящее время в АО «ММК» за счет сокращения поставок других видов железорудного сырья, содержащих повышенное количество магнезии, возможно потребление до 50 тыс. т/месяц концентрата обожженного сидерита (KOC) в качестве аглоруды без ухудшения металлургических свойств доменного шлака в достигнутых пределах колеблемости химического состава агломерата. Отмеченные пределы потребления ЖРС Бакальского месторождения сидеритов позволяют получать доменный шлак с содержанием магнезии (MgO) до 9%. Такое содержание магнезии (приложение) обеспечивает плавное изменение вязкости («длинные шлаки») с изменением температуры и основности шлака. С повышением содержания магнезии (более 9-10%) устойчивость шлака по вязкости теряется («короткие шлаки»). И в случае текущего (случайного) увеличения основности шлака (изменение ровности химического состава ЖРС) либо потери температуры (при похолодании печи) вязкость как первичных, так и конечных шлаков резко увеличивается, что приводит к расстройству хода доменной печи.

Новые технологии должны либо снизить содержание магнезии (желательно одновременно повысить содержание

железа) в бакальских сидеритах, либо позволить увеличить потребление в металлургическом переделе бакальского сырья текущего состава.

В МИСиСе выполнены технологические расчеты прямой переработки бакальского сырья процессом «Romelt» с получением чугуна. Расчеты, выполненные с использованием КОС, концентратов СМС и MMC (после металлизации по процессу «Новометстрой-21»), показывают принципиальную технологическую возможность переработки бакальского сырья. Все варианты включают добавки песка ( $\text{SiO}_2$ ) и извести для наведения шлака необходимого состава. Расходы отмеченных добавок, твердого топлива (более чем в 2 раза) и кислорода (в 2 раза) на выплавку чугуна снижаются по мере роста уровня подготовки сидеритовой руды (от КОС до концентрата MMC). Предложено для снижения расхода флюсов использовать шламы ККЦ и пыль ЭСПЦ с одновременной утилизацией железа.

Расчеты выполнены для модуля «Romelt» мощностью 0,3 млн т/г чугуна. При приведении всех вариантов к одинаковой площади пода печи (30 м<sup>2</sup>) производительность во 2-м и 3-м вариантах составит соответственно 0,45 и 0,5 млн т/г чугуна.

ООО НПВП «Новометстрой-21» в результате проведенной НИОКР предлагает следующую технологию получения металлизованных брикетов из бакальских сидеритов:

- предварительное обогащение исходной сидеритовой руды крупностью 30-250 мм рентгенорадиометрической сепарацией (PPC) с получением промпродукта (выход-60%), содержащего, %:  $\text{Fe}_{\text{PPC}}$ -34,0-34,5;  $\text{FeO}$ -44,0; S-0,15;  $\text{MgO}$ -9,0;  $\text{MnO}$ -1,5;  $\text{SiO}_2$ -6,8;  $\text{CaO}$ -2,0; ппп-32,3;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -1,7;
- восстановление при 1250оС промпродукта PPC крупностью 10-30 мм в шахтных печах с использованием природного газа и тощего угля крупностью 10-30 мм в объеме 15-20% от массы промпродукта PPC;
- сухая магнитная сепарация (СМС) восстановленного продукта при напряженности магнитного поля 1000 эрстед с получением концентрата СМС, содержащего, %:  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ -56,0;  $\text{Fe}_{\text{мет}}$ -54,6;  $\text{FeO}$ -1,8;  $\text{MgO}$ -15,3;  $\text{SiO}_2$ -10,6;  $\text{CaO}$ -1,4;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -2,0; S-0,2; Ств-7,8;  $\text{MnO}$ -2,5;
- измельчение концентрата СМС до 90% класса менее 0,071 мм с выделением корольков металлического железа;
- мокрая магнитная сепарация (MMC) концентрата СМС с получением концентрата MMC, содержащего, %:  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ -до 90,5;  $\text{Fe}_{\text{мет}}$ -до 90,0;  $\text{MgO}$ -до 5,0;
- брикетирование концентрата MMC с органическим связующим.

Согласно расчетам из 2,5 млн т/г исходной сидеритовой руды получается 1,5 млн т промпродукта PPC, концентрата СМС-0,85 и 0,55 млн т металлизованных брикетов.

По расчетам специалистов ЦПК ОАО «ММК» такой металлизованный продукт может быть использован в металлошахте для электроплавки в объеме до 10%.

В МГТУ им. Г.И. Носова в лабораторных условиях разработана технология комплексной переработки бакальских сидеритов. Обжиг руды крупностью 2-10 мм при температуре 480-540°C без доступа воздуха осуществляли в течение 2,5-3 ч с последующей магнитной сепарацией. После помола магнитной фракции и активации паром проводили выщелачивание слабой угольной кислотой при нормальных условиях [1,7,8]. Метод позволял удалять 40-60%  $\text{MgO}$  в исходной руде с получением железорудного концентрата (около 55%) и оксида марганца (около 99%  $\text{MgO}$ ).

Недостатки технологии углекислотного выщелачивания ЖРС Бакальского месторождения:

- выделение  $\text{MgO}$  не превышает 60% от его содержания в исходном продукте, что не позволяет существенно увеличить объем вовлекаемых в металлургический передел сидеритовых руд;
- переработка сырья проводится по сложной и затратной схеме и требует тщательной технико-экономической оценки.

Как было показано выше, традиционные технологии подготовки бакальского ЖРС к металлургическому переделу не позволяют разделить оксиды Mg и Fe, входящие в кристаллическую решетку минералов. Выщелачиванием можно выделить частично тот или иной компонент из кристаллической решетки минералов, представляющих собой изоморфную смесь карбонатов Fe, Mg, Mn, Ca. Полное разделение можно получить лишь разрушением кристаллической решетки в процессе плавления.

В последнее время активно продвигается технология получения гранулированного чугуна в печах с вращающимся подом (ПВП) по технологии iTmk3 (Ironmaking Technology mark 3 – технология получения чугуна 3-го поколения), разработанная компаниями Kobe Steel и Midrex [1]. Привлекает внимание легкость отделения пустой породы в виде шлака от чугуна. Сущность этой технологии заключается в том, что ЖРС смешивается с твердым топливом и флюсами, окомковывается в виде окатышей, которые после подсушки подвергаются термической обработке в печи с вращающимся подом (ПВП) при температурах 1350-1450°C в течение 9-12 минут. В процессе термообработки после восстановления и науглероживания железа происходит плавление и коагуляция отдельных капель чугуна в гранулы, которые после затвердевания отделяются от шлака на магнитном сепараторе.

Преимущества технологии:

- получение чугуна достигается за 9-12 мин. против 6-8 ч. в доменной печи;
- нет проблем с остановкой и пуском ПВП;
- существенное снижение удельных капитальных затрат, поскольку нет необходимости в сооружении коксовых печей и фабрик окускования;
- снижение на 23 % выбросов NOx, SOx, CO2, а также пыли в окружающую среду;
- возможность переработки труднообогатимых и комплексных руд;
- чугун является заменителем значительной части (до 30%) скрапа и может в горячем виде загружаться в электропечь;
- эксплуатационные расходы на производство чугуна ниже на 20% по сравнению с доменным производством;
- нет проблем с пассивацией (от возгорания) продукции, транспортировкой и хранением, образованием мелочи при транспортировке;
- энергетические затраты на производство чугуна ниже затрат на производство доменного чугуна на 30-35% за счет полного потребления химической энергии внутри системы;
- железистомагнезиальный шлак может быть использован в качестве комплексного флюса для увеличения срока службы футеровки конверторов и ускорения процесса шлакообразования.

Первая промышленная ПВП мощностью 0,5 млн т/г чугуна по этой технологии была запущена в США (штат Миннесота) в 2010 г.

Элементы этой технологии были использованы при испытании бакальского ЖРС в лабораториях ОАО «ММК», МГТУ им. Г.И. Носова на первом этапе и в лаборатории Nissrin (Kobe Steel, Ltd) – на втором.

Целью первого этапа проведения исследований являлось установление принципиальной возможности получения чугуна из бакальского ЖРС напрямую, минуя аглодоменный маршрут. На втором этапе изучалась возможность увеличения выхода чугуна за счет добавки в шихту концентрата ССГПО. Расчетным путем, используя диаграммы состояния шлаков в системе CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, по химическому составу компонентов шихты определили область пироксена с температурами плавления первичного шлака в пределах 1300-1400°C [4] и в шихту вводили соответствующий флюс (в основном кварцит) в необходимом количестве.

Расход твердого топлива определяли с учетом стехиометрической потребности в углероде на прямое восстановление железа.

Из подготовленных шихт изготавливали и высушивали окатыши диаметром 19 - 20 мм. Термообработку окатышей вели в камерных лабораторных печах, позволяющих контролировать необходимую температуру и атмосферу, на подложках из периклазуглеродистого огнеупора и в стеклоуглеродистых тиглях.

На первом этапе нагрев окатышей вели в камерной печи «Nabertherm», позволяющей контролировать заданный темп нагрева и требуемую выдержку в пределах до 1800°C. Нагрев проходил в атмосфере окружающей среды. На втором этапе, кроме того, контролировали температуру окатышей и анализировался по ходу нагрева отходящий газ на содержание в нем CO и CO<sub>2</sub>. Нагрев осуществляли в атмосфере азота.

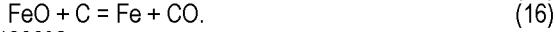
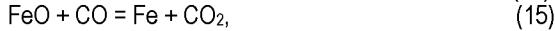
Печь вместе с подложкой разогревали до 1450°C, после чего подложка вынималась из печи для размещения на ней исследуемого материала. Затем подложка с материалом вновь помещалась в печь, где материал выдерживался в печи в течение 9-12 минут.

По мере прогрева материала значительная часть химических (диссоциация карбонатов, восстановление оксидов железа, кремния, марганца) и физико-химических (формирование и плавление чугуна и шлака) превращений могли протекать одновременно:

выше 500-600°C



выше 1100°C



выше 1300°C



Гранулированный чугун получали как из сырой сидеритовой руды, так из КОС, а также из смеси ЖРС. С точки зрения увеличения выхода чугуна с максимальным вовлечением КОС оптимальный состав ЖРС для изготовления окатышей составил 30 % КОС и 70 % концентрата ССГПО. Во всех опытах чугун легко отделялся от шлака и имел шаровидную форму (либо форму гальки) диаметром от 3 до 10 мм и более. Шлак выделялся в виде лепешек с включениями корольков чугуна диаметром 1-2 мм.

В результате проведенных лабораторных испытаний установлена принципиальная возможность получения гра-

нулированного чугуна напрямую по технологии ITmk3 из ЖРС Бакальского месторождения. При этом металл получали из сырой сидеритовой руды, КОС, а также из смеси КОС и концентрата ССГПО, что открывает широкие возможности для увеличения объемов переработки этого сырья.

Технология ITmk3 позволяет контролировать состав чугуна путем изменения расхода и вида твердого топлива и флюсов, а также выбор температурно-временных параметров ведения процесса.

Уместно отметить, что предложенная технология позволяет проводить металлизацию без обогащения руды, то есть уменьшить расходы на эту операцию, а также на депонирование хвостов. Кроме того, эта технология открывает возможность перерабатывать хвости обогащения, хранящиеся в техногенных образованиях. Расчеты показывают, что срок окупаемости капитальных затрат на сооружение такого агрегата составляет 1,8-5,8 года в зависимости от вида и объема перерабатываемого ЖРС. Разработанную технологию следует учитывать при рассмотрении вариантов переработки бакальских сидеритов с целью увеличения объемов добычи этого сырья. Для снижения транспортных расходов реализацию соответствующих проектов целесообразно осуществлять вблизи месторождения. В пользу этого говорит близкое расположение к ним месторождений других составляющих компонентов шихты для получения гранулированного чугуна: Улу-Тулякское и Тургоякское месторождения известняков, Бакальское месторождение кварцитов, энергетические угли угольных бассейнов Челябинской области. Бакальское рудоуправление располагает необходимой инфраструктурой и энергоресурсами. К преимуществам следует отнести создание новых рабочих мест, увеличение налоговой базы для наполнения бюджетов различного уровня, обеспечение чугуном стабильного качества на основе первородного сырья в необходимом объеме стальплавильных агрегатов металлургических предприятий области в городах Челябинск, Магнитогорск, Златоуст, Аша и др.

Новые технологии должны либо снизить содержание магнезии (желательно одновременно повысить содержание железа) в бакальских сидеритах, либо позволить увеличить потребление в металлургическом переделе бакальского сырья текущего состава.

Последние исследования показывают возможность переработки бакальского ЖРС по технологиям выщелачивания, жидкофазного восстановления и глубокой металлизации, но требуют тщательной технико-экономической оценки.

#### Список литературы

- Бигеев В.А., Колесников Ю.А., Сергеев Д.С. Состояние и перспективы использования сидеритовых руд Бакальского месторождения // Теория и технология металлургического производства. 2013. N 1(13). С.6-8.
- Панишев Н.В., Бигеев В.А. Переработка комплексных руд Южного Урала глубокой металлизацией // Теория и технология металлургического производства. 2016. N 2(19). С. 68-70.
- Металлургическая оценка разновидностей сидеритовых руд Бакальского месторождения и разработка вариантов их подготовки к металлургическому переделу./ отчет о НИР. Пастухов Э.А., Леонтьев Л.И., Шаврин.С.В.Институт metallurgии УО АН СССР. Свердловск, 1990, 129 с.

4. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков. М.: Металлургия, 1974. 120 с.
5. Меламуд С.Г., Дудчук И.А., Юрьев Б.П. Разработка технологии обогащения отсевов siderитовой руды шахтной добычи // Сталь. 2014. N 9. С.5-8.
6. Меламуд С.Г., Юрьев Б.П., Дудчук И.Г. Использование siderитовых руд при производстве агломерата и выплавке чугуна // Сталь. 2015. N 1.С.5-8.
7. Ключковский С.П., Смирнов А.Н., Савченко И.А. Разработка физико-химических основ комплексного использования высокомагнезиальных siderитов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. 1(49).С.26-31.
8. Разработка принципиальных основ технологии комплексной переработки высокомагнезиальных siderитов / В.М. Колокольцев, С.П. Ключковский, А.Н. Смирнов, И.А. Савченко // Физико-химическая геотехнология: материалы научной конференции. М. 2013. Т.2. С.41-44.
9. Пат. 2483118 РФ, МПК C 21 B 11/06, C 21 B 13/08. Способ металлизации siderитового сырья с получением гранулированного чугуна и железистомагнезиального шлака / Рашников В.Ф., Дубровский Б.А., Галкин В.В., Панишев Н.В., Князев Э.В., Авраменко В.А., Гладских В.И., Кошкада А.Н., Борисенко В.А., Гаврилов А.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «ММК» (RU). N2011149499; заявл. 05.12.2011; //опубл. 27.05.2013.
10. Металлизация шпатовых железняков Бакальского месторождения с получением гранулированного чугуна / Дубровский Б.А., Шиляев П.В., Редин Е.В., Панишев Н.В., Князев Э.В., Пильщиков И.В., Церковницкий Н.С. // Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», посвященной 80-летию ММК, Москва, 15-20 октября. М. 2012. С.178-182.

#### Сведения об авторах

**Панишев Николай Васильевич** - доц. кафедры ТМ и ЛП, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», канд.техн.наук, Тел. 8(3519) 29-85-73. E-mail: n.panishev@magtu.ru.

**Бигеев Вахит Абдрашитович** - проф. кафедры ТМ и ЛП, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», д-р техн.наук, профессор, Тел. 8(3519)29-85-59. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru.

**Дудчук Игорь Анатольевич** - канд. техн.наук, директор по стратегическому развитию и маркетингу НПРО «Урал». Тел. 735190778420. E-mail:igor.dudchuk@gmail.com,456780.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### EXPERIENCE, PROBLEMS AND PERSPECTIVES OF PROCESSING OF BAKAL DEPOSIT SIDERIRITE IRON ORE

**Panishev Nikolay Vasilyevich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: n.panishev@magtu.ru

**Bigeev Vakhit Abdrazhitovich** - D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

**Dudchuk Igor Anatolyevich** - Ph.D.(Eng.), Director for Strategy and Marketing of NPRO «Ural», Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail:igor.dudchuk@gmail.com

**Abstract:** The capacity of the Bakal deposit of iron ore bearing iron carbonate (siderite) is about 1 billion tones. This ore cannot be fully processed via blast furnace technology because of high content of MgO. If a lot of MgO enters the blast furnace, slag becomes viscous. The viscous slag is obstacle for stable operation of the blast furnace. Most perspective technologies of siderite ore processing are Romelt, ITmk3 as well as using carbonic acid for beneficiation of raw ore.

**Keywords:** siderite, magnesium oxide, blast furnace, ITmk3, iron nugget

◆ Ссылка на статью:

Панишев Н.В., Бигеев В.А., Дудчук И.А. Опыт, проблемы и перспективы переработки шпатовых железняков бакальского месторождения // Теория и технология металлургического производства. 2017. №1(20). С. 7-15.

Panishev N. V., Bigeev V. A., Dudchuk I. A. Experience, problems and perspectives of processing of bakal deposit sideririte iron ore. *Teoria i tecnologija metallurgiceskogo proizvodstva.* [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2017, vol. 20, no. 1, pp. 7-15.