В. Шацилло, С. Меламуд, А. Лунегов, И. Дудчук, *ОАО «Бакальское рудоуправление», ОАО «Уралмеханобр»*

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИДЕРОПЛЕЗИТОВ БАКАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО АГЛО-ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Бакальское месторождение карбонатных железосодержащих руд, условно называемых сидеритовыми, состоит из основного рудного минерала — сидероплезита, в котором часть железа замещается магнием и марганцем.

Достаточно крупные запасы бакальских сидеритов, составляющие по сумме категорий $A+B+C_1+C_2$ около 1 млрд т, и его расположение вблизи крупнейших металлургических комбинатов Урало-Сибирской зоны (НТМК, МЕЧЕЛ, ММК, ОХМК, НКМК и ЗСМК) определяют его значимость особенно в условиях дефицита железорудного сырья для выплавки передельного чугуна на Урале и в Сибири.

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 °С в виде углекислого газа. Содержание вредных для металлургии примесей серы и фосфора незначительно. Верхние части залежей сидеритов окислены и превращены в бурые железняки с Fe=45—52%. В настоящее время бурые железняки в значительной степени отработаны. Особенности минералогического состава сидеритов:

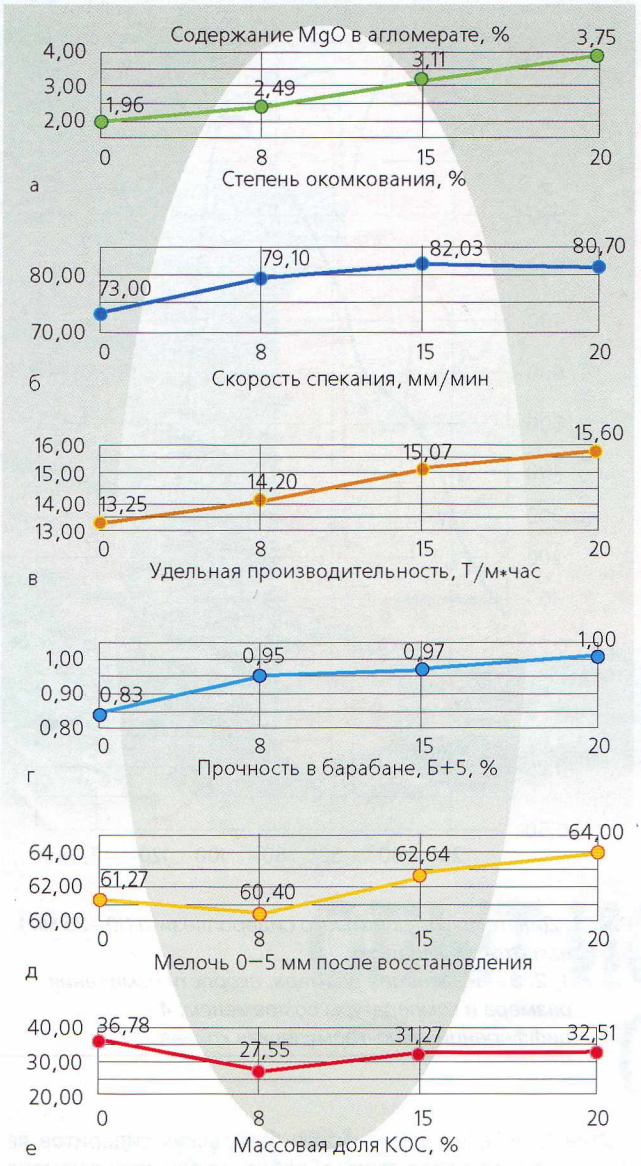

Рис. 2. Влияние массовой доли концентрата обожженного сидерита в аглошихте ВГОК на характеристики лабораторных спеканий в установке «чаша-горн»

Таблица 2. Фактическое и приведенное к единой основности содержание железа в рудных материалах ОХМК

Рудный компонент	Массовая доля, %	
	$Fe_{факт.}$	$Fe_{привед.}$
Михайловская руда	54,6	48,1
Бакальская руда	30,8	43,5
Михайловский концентрат	65,9	60,4
Стойленский концентрат	66,3	61,2

Таблица 3. Гранулометрический состав бакальской руды

Классы, мм	Более 20	20–13	13–10	10–5	5–0
Массовая доля классов, %	4,7	14,3	11,7	29,7	39,6

Однако, судя по кривой 1 на рисунке 1, экспериментальная 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. В таблице 1 сопоставлены прочности типичных агломератов и окатышей Качканарского ГОКа с КОС.

Очевидно, что разрушение КОС в стандартном барабане значительно выше и выход фракции более 5 мм не превышает 50%.

Учитывая изложенные особенности физико-химических процессов при нагреве сидеритов, нами предложен ряд путей использования труднообогатимого комплексного сырья, основываясь преимущественно на технологии агломерации, когда рудные частички, проходя через расплав, образуют прочную структуру независимо от свойств исходного материала. Ниже приводятся направления возможного использования сидеритов Бакала.

Сырой аглосидерит

Сырой аглосидерит крупностью 10—0 мм может быть добавлен в аглошихту, содержащую не менее 50% тонко измельченных богатых концентратов с кислой пустой породой. В ходе агломерации происходит естественное обогащение сидерита за счет удаления газообразной углекислоты по реакциям (1), (3), (4) и (6), а содержание железа поднимается в нем до 44—46%. При этом сидерит служит крупнозернистой добавкой к аглошихте и обеспечивает требуемую для спекания концентратов газопроницаемость слоя шихты. В связи с этим ввод сидерита позволит исключить магнетитовую руду, подаваемую в аглошихту без обогащения и направить ее на измельчение и мокрую магнитную сепарацию. Рост доли богатых концентратов увеличит содержание Fe в агломерате.

Сырой сидерит, содержащий 8—10% Mg, позволяет заменить традиционные флюсы, такие как известняк и доломит, сохраняя оптимальный состав агломерата и доменных шлаков.

Аглоконцентрат обожженного сидерита

Для обогащения сидерита непосредственно в месте его добычи 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 магнезиоферрита по реакции (4). Это позволяет использовать магнитную сепарацию для отделения алюмо-силикатных минералов. Железо-магнезиальный концентрат обожженного сидерита (КОС) содержит 50% Fe и 12—14% MgO. После измельчения до агломерационной крупности 10—0 мм он может использоваться в качестве рудной добавки к аглошихте аналогично сырому сидериту. Вопрос целесообразности использования сырого или обожженного сидерита в аглошихте решается в зависимости от местных условий, определяющих транспортные затраты, качество выводимых руд и др.

Кусковый концентрат обожженного сидерита

Кусковый концентрат обожженного сидерита крупностью 10—80 мм до 1994 года использовался для прямой загрузки в доменные печи на Челябинском, Орско-Халиловском, Карагандинском и Нижнетагильском металлургических комбина-

Таблица 4. Технологические показатели работы аглофабрики ОХМК в базовый и опытный периоды использования бакальского сидерита

№ п/п	Показатели		Размерность	Значения показателей в периоды: Базовый 1-10.07. 2002 г.	Опытный 11-31.07. 2002 г.
1	2		3	4	5
1	Расход шихтовых материалов	Михайловская руда	кг/ т агл.	387	261
		Михайловский к-т		115	323
		Стойленский к-т		379	189
		Бакальская руда		-	87
		Шлам		30	31
		Колошниковая пыль		11	11
		Коксик		50	51
		Известняк		162	153
		Известь		31	37
2	Доля богатых концентратов Михайловского и Стойленского ГОКов		%	56,1	59,5
3	Показатели работы агломашин	Скорость спекания	мм/мин	15,1	15,0
		Высота слоя	мм	298	298
		Температура перед эксгаустером	°С	116	121
		Температура зажигания	°С	1214	1205
		Разр. перед эксгауст.	мм вод.ст.	761	736
		Разряж. в коллекторе	мм вод.ст.	603	573
		Удельная производительность машин	т/м^2/ч	1,032	1,029
4	Качество агломерата	Прочность на удар, +5 мм	%	67,0	69,0
		Истираемость, -0,5 мм	%	4,5	4,4
		Мелочь 0-5 мм	%	17,1	16,8
5	Хим. состав агломерата	Fe	%	52,9	53,7
		FeO	%	11,4	11,3
		MgO	%	0,55	1,2
		CaO	%	1,4	1,3
		S	%	0,033	0,025

тах. Однако в связи с резким увеличением стоимости кокса использовать бедное непрочное по сравнению с агломератом сырье (табл. 1) в крупных печах стало нецелесообразно, и производство КОС было прекращено с 1995 года. Тем не менее, увеличение спроса на чугун в 2003—2005 годах привело к тому, что кусковый КОС стали успешно применять заводы, на которых нет собственных аглофабрик, но есть доменные печи объемом до 1000 м^3. Однако в них объем потребности кускового КОС не превышает 10—15 тыс. т в месяц. В связи с вышеизложенным, рассматриваются полученные результаты опытно-промышленного применения сидеритов в аглопроизводстве крупных металлургических предприятий.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЫРОГО АГЛОСИДЕРИТА НА ОРСКО-ХАЛИЛОВСКОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ КОМБИНАТЕ («УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»)

На большинстве аглофабрик России, включая ОХМК, стандартная шихта содержит около 20% дробленых кусковых руд с Fe=45—54%, 50—70% тонко измельченных концентратов с Fe=60—65% и 10—15% отходов металлургических производств. На ОХМК в качестве аглоруды применяют михайловскую, а концентратов — михайловские, стойленские и лебединские. Для обеспечения требуемой основности агломерата в шихту добавляют известняк в количестве до 20% от массы шихты и 30—35 кг/т агл. извести. Анализ химического состава основных компонентов шихты показал, что пустая порода рудной части кислая. Это не дает возможности поднять содержание железа в агломерате за счет большей доли концентратов из-за резкого падения производительности машин при формировании вязкого расплава, близкого по составу к оливинам. Кроме того, практически полное отсутствие оксидов магния в рудах и концентратах КМА не обеспечивает оптимальный состав доменных шлаков при плавке агломератов.

Для устранения недостатков, присущих стандартной шихте ОХМК было предложено ввести в аглошихту сырую бакальскую руду, которая состояла преимущественно из аглосидерита с небольшими добавками бурого железняка. Для того чтобы определить, какой компонент надо выводить из шихты, основываясь на данных химического анализа, рассчитали приведенное содержание железа ($Fe_{прив.}$) в рудных компонентах. Оно дает возможность сравнить ценность сырья для получения офлюсованного доменного агломерата. Расчет выполнен из предположения, что агломерат спекается только из одного рудного компонента с добавкой известняка для получения агломерата с наиболее часто встречающейся основностью по отношению CaO/SiO_2 в низкомагнезиальных агломератах (MgO≤1%), равную 1,2, а в высокомагнезиальных — 1,0 ед. Величину $Fe_{прив.}$ определяли по соотношению:

$$Fe_{прив.}=Fe^{р}_{факт.}\cdot P_{р}+Fe^{и}_{факт.}\cdot P_{и} \quad (9)$$

где: $Fe^{р}_{факт.}$ — фактическое содержание железа в рудном компоненте, мас., %; $Fe_{прив.}$ — приведенное к единой основности содержание железа, мас., %; $P_{р}$ — расход рудного компонента, т/т агл.; $P_{и}$ — расход известняка, т/т агл.; $Fe^{и}_{факт.}$ — фактическое содержание железа в известняке.

Чтобы найти $P_{р}$, решали систему уравнений материального баланса при получении 1 т агломерата:

$$CaO/SiO_2 = \frac{(CaO)_р \cdot P_р + (CaO)_и \cdot P_и + (CaO)_{3т} \cdot 3Т \cdot P_т}{(SiO_2)_р \cdot P_р + (SiO_2)_и \cdot P_и + SiO_{2зт} \cdot 3 \cdot P_т} \quad (10)$$

$$1 + P_р(1 - ППП_р) + P_и(1 - ППП_и) + P_т \cdot 3Т \quad (11)$$

где: $P_р$, $P_и$, $P_т$ — расходы руды, известняка и топлива на 1 т агломерата, т/т агл.; $(CaO)_р$, $(CaO)_и$, $(CaO)_{3т}$, $(SiO_2)_р$, $(SiO_2)_и$, $(SiO_2)_{3т}$ — массовые доли оксидов Ca и Si в руде, известняке и золе топлива, ед.; $(ППП)_р$, $(ППП)_и$ — массовая доля потерь при прокаливании руды и известняка; 3Т — массовая доля золы в топливе.

Расход топлива и его зольность для спекания всех типов руд приняли одинаковыми и равными среднеотраслевым нормам: $P_т$=0,05 т/т агл., 3Т=0,2 ед. В этом случае, решая два уравнения (10) и (11) с двумя неизвестными находили величины $P_т$ и $P_и$. Результаты расчетов для ряда рудных материалов представлены в таблице 2.

Из нее следует, что наиболее близкими компонентами по содержанию приведенного железа являются михайловская руда и сырой сидерит. Учитывая значительно более низкие транспортные затраты при перевозке бакальского сырья и указанные выше преимущества, замена части михайловской руды на сидерит оказывается экономически целесообразной, несмотря на более высокое содержание железа в михайловской руде.

Для оценки эффективности замены части михайловской руды на бакальское сырье в июле 2002 года провели опытно-промышленные испытания. В базовый период с 1 по 10 июля бакальское сырье не использовали, а в опытный — с 11 по 31 июля — вводили в количестве 7—9%. Его гранулометрический состав представлен в таблице 3, а показатели работы аглофабрики — в таблице 4.

Как следует из графы 2 таблицы 4, в опытный период удалось поднять долю тонкозернистых богатых концентратов с 56,1 до 59,5% без падения производительности машин даже при несколько меньшем разряжении в коллекторе. Это позволило получить более богатый агломерат, содержащий Fe=53,7%. Достигнутый результат объясняется сокращением температурного интервала вязкопластичного состояния магнезиальных расплавов, образующихся при спекании в опытном периоде по сравнению с силикатными — в базовом. Прочность опытного агломерата по всем показателям (удар, истираемость, содержание мелочи) несколько улучшилась (табл. 4) из-за присутствия оксида магния, позволяющего вести процесс при повышенных температурах. О реализации этого свидетельствует рост температуры газов перед эксгаустером с 116 °С в базовом периоде до 121 °С — в опытном (см. графу 3, табл. 4).

Изменение металлургических свойств агломерата отразилось на показателях его доменной плавки.

Анализ данных показал, что в опытный период содержание Mg в шлаке было выше, чем в базовый на 1,5%, а Al_2O_3 ниже на 0,8%. Расчеты, выполненные нами по данным экспериментальных замеров показали, что шлаки, образующиеся при плавках агломерата с сидеритом, имеют более низкую вязкость и интервал вязко-пластичного состояния. Это обеспечило снижение газопроницаемости столба шихты и позволило увеличить расход дутья с 2770 до 2896 $нм^3$/т чугуна с соответствующим ростом производительности печи и снижением расхода кокса.

Улучшению технико-экономических показателей доменной плавки способствовал также рост содержания железа в агломерате за счет большей доли богатых концентратов в аглошихте опытного периода. Приведение производительности печи и расхода кокса к единым значениям параметров, не зависящим от изменения качества агломератов (температура дутья, качество кокса, простои печи) по стандартной методике показало, что ввод сидерита в аглошихту позволил без увеличения расхода кокса поднять производительность печи не менее, чем на 8%. При этом 2,5% прироста достигнутом за счет повышения содержания железа в агломерате, а остальное — в результате оптимизации шлакового режима.

Таким образом, замена михайловской руды на сырой сидерит, несмотря на уменьшение приведенного содержания железа в нем, в условиях ОХМК дало положительный результат. Об экономической целесообразности использования сидерита свидетельствует то, что он вводится в аглошихту на протяжении последних пяти лет постоянно.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕНТРАТА ОБОЖЖЕННОГО СИДЕРИТА (КОС) НА ВЫСОКОГОРСКОМ ГОКЕ

Очевидно, что технологический эффект от использования сидерита может быть более заметным, если поднять содержание железа в нем за счет обжиг-магнитного обогащения. Поэтому на Высокогорском ГОКе в период с ноября 2003 по март 2004 годов провели промышленные испытания по замене богословского концентрата сухой магнитной сепарации на концентрат обожженного сидерита. Приведенное содержание железа в КОСе и богословском концентрате СМС одинаково. Однако малое количество в бакальском сырье вредных примесей серы и меди, а также наличие магнезии, недостающей в остальных компонентах, обусловливает целесообразность вывода богословской руды из аглошихты и частичную замену ее на КОС.

Для выбора оптимального соотношения рудных компонентов провели лабораторные спекания шихт ВГОКа на аглочаше ОАО «Уралмеханобр» с различной долей КОС. Основные результаты исследований представлены на рисунке 2.

Как и следовало ожидать, рост содержания КОС приводит к повышению доли MgO в агломерате (рис. 2 а). Для большинства аглофабрик оптимальным с точки зрения формирования доменных шлаков с низкой вязкостью является отношение MgO/Al_2O_3 в агломерате, равное 0,7—1,0 ед. Поскольку массовая доля Al_2O_3 в рудах и концентратах Тагило-Кушвинского бассейна равна 2,0—3,0%, то достигаемое содержание MgO=2,5% при расходе КОС 8—10% следует считать близким к оптимальному. Именно в указанном диапазоне имеет место максимальная степень окомкования шихты, которая возрастает с 73% без КОС до 80—82% при 10% КОС (рис. 2 б). Ее рост объясняется наличием небольшого количества свободной извести и магнезии, которые образуются в ходе декарбонизации и являются вяжущими веществами. Улучшение комкуемости шихты естественно способствует активизации горения топлива и увеличивает скорость спекания агломерата (рис. 2 в и 2 г).

Добавка КОС к агломерату ВГОКа позволила не только оптимизировать его состав и ускорить спекание, но и увеличить прочность после восстановления в условиях аналогичных верхним горизонтам доменных печей (рис. 2 е). Испытания горячей прочности агломерата после восстановления проводились в установке типа Линдера по ГОСТ 19576-86. Холодная прочность измерялась в стандартном барабане по ГОСТ 15137-87 и увеличивалась по сравнению с шихтой без КОС только при его концентрации более 10%, когда шлаковая фаза агломерата гомогенизировалась.

Характерно, что при одинаковом расходе концентрата ММС рост КОС с выводом рудной смеси приводил к обогащению агломерата по железу:

Массовая доля КОС в шихте, %	0	8	15	20
Массовая доля Fe в агломерате, %	55,3	55,6	55,8	56,6

Таблица 5. Химический состав и приведенное содержание железа в темирской руде, используемой на Абагурской аглофабрике

Элементы	$Fe_{общ.}$	$Fe_{прив.}$	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	S	ППП
Массовая доля элементов, %	47,5	42,0	4,5	1,7	15,0	2,0	0,4	4,0

Рост массовой доли железа подтвердил тот факт, что приведенное содержание железа в КОСе выше, чем в концентрате СМС Богословского РУ. Выявленные в лабораторных условиях тенденции были подтверждены в промышленных условиях Лебяжинской аглофабрики ВГОКа. КОС вводили в аглошихту вместо рудной смеси, которая состояла преимущественно из концентрата СМС Богословского РУ. Массовая доля КОС соответствовала оптимальной величине, установленной в лабораторных опытах и была равна 10%.

Установлено, что удельная производительность агломашин за счет лучшей комкуемости шихты с КОС выросла в среднем на 5—6%, а выход крупных классов более 10 мм после восстановления в установке Линдера увеличился с 11 до 15—17%. Рост горячей прочности сопровождался снижением истираемости почти на 30% и связан, главным образом с тем, что гематит связывается в комплексные магнезиоферриты, которые не разбухают на начальной стадии восстановления. Опытные партии магнезиальных агломератов ВГОКа проплавлялись на доменной печи №5 НТМК совместно с окатышами Михайловского ГОКа. При неизменной 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—5 мм (рис. 2 е), так и в нижних из-за наведения более жидкоподвижных шлаков с оптимальным отношением MgO/Al_2O_3, 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 Костомукшского ГОКов. Технологии производства и доменной плавки магнезиального агломерата с добавкой КОС внедрены на ВГОКе и НТМК. Ее использование в 2005 году позволило обеспечить дальнейшее снижение привозных окатышей, доля которых в настоящее время не превышает 10%.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОС НА АБАГУРСКОЙ АГЛОФАБРИКЕ И НОВОКУЗНЕЦКОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ КОМБИНАТЕ

Специфические свойства КОС как рудной добавки с высоким приведенным содержанием железа позволили провести успешные испытания на Абагурской аглофабрике по замене им местных окисленных руд (темирская), состав которой представлен в таблице 5.

Сопоставление с составом КОС показывает, что содержание приведенного железа в нем выше на 6,5%, а серы — ниже в 2 раза. Поэтому вывод части бедных руд и использование 8—9% КОС в аглошихте позволило существенно улучшить металлургические свойства агломератов. В соответствии с приведенным содержанием железа замена части темирской руды на КОС, обеспечила увеличение массовой доли железа в агломерате на 1,5%. Введение оксида Mg в аглошихту, как и на ВГОКе привело к увеличению прочности агломерата после восстановления с 18,0 до 31,7% по выходу крупных классов более 10 мм в установке Линдера.

Улучшение металлургических свойств агломератов с КОС позволило обеспечить экономию кокса в количестве не менее 5 кг/т чугуна и поднять производительность доменной печи №4 на 1,5%. Это дало возможность достичь экономического эффекта, несмотря на большую цену КОС по сравнению с местной темирской рудой.

ВЫВОДЫ

- На Бакальском РУ в настоящее время освоен выпуск трех видов железорудной продукции:
  - аглосидерит крупностью 13—0 мм с $Fe_{общ.}$ = 30—32%, MgO= 8—10%;
  - концентрат обожженного сидерита (КОС) крупностью 10—0 мм с $Fe_{общ.}$ = 50—52%, MgO=12—14%;
  - концентрат обожженного сидерита крупностью 10—60 мм с $Fe_{общ.}$ = 49—50%, MgO=12—14%;
- Разработаны технологии использования сырого сидерита и КОС в аглопроизводстве ряда металлургических предприятий. Установлено, что КОС по приведенному к условиям оптимальной основности агломератов содержанию железа превосходит известные крупнозернистые руды РФ на 2—10% и обладает в отличие от них вяжущими свойствами.
- На предприятии «Уральская Сталь» (ОХМК) внедрена технология производства агломерата с добавкой 8—10% аглосидерита в шихту. Это позволило улучшить газопроницаемость слоя на спекательных тележках и ввести дополнительное количество тонкозернистых богатых концентратов без снижения производительности агломашин и снижения прочности агломерата с повышенным содержанием железа.
- На Лебяжинской (ВГОК) и Абагурской (Евразруда) аглофабриках освоен выпуск магнезиальных агломератов с добавкой около 10% КОС в аглошихту. Эти агломераты обладают по сравнению с обычными рядом преимуществ:
  - повышенным содержанием железа;
  - оптимальным соотношением MgO/Al_2O_3, близким к единице, обеспечивающим формирование в доменной плавке жидкоподвижных шлаков;
  - повышенным на 5—6% выходом агломерата с 1 $м^2$ площади машин;
  - повышенной прочностью после восстановления;
- Доменная плавка магнезиальных агломератов сопровождается снижением по сравнению с обычными газодинамическим сопротивлением столба шихты. Это обеспечивает экономию кокса и рост производительности печей при одинаковом соотношении массовых долей агломерата и окатышей. При дефиците или высокой стоимости окатышей замена их на магнезиальный агломерат позволяет без ухудшения технико-экономических показателей доменных плавок снизить себестоимость чугуна. На НТМК доля привозных окатышей сократилась в 2004—2005 годах с 30 до 10%.
- Учитывая положительные результаты использования сырых и обожженных сидеритов на НТМК, НКМК и ОХМК считаем целесообразным продолжить работы по замене аглоруд в условиях ряда металлургических комбинатов: ММК, Северсталь, МЕЧЕЛ, Тулачермет.