

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»**

*На правах рукописи*

*Овчинн*

Овчинникова Елена Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА МАГНЕЗИАЛЬНОГО ФЛЮСА НА  
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ АГЛОМЕРАТА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО  
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*05.16.02 - Metallurgy of black, colored and rare metals*

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:

Кандидат технических наук,

Горбунов Владислав Борисович

Москва, 2018

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В мировой практике производство магнезиальных агломератов получило широкое распространение ввиду того, что исследованиями многих ученых, таких как А. Н. Пыриков, В.А. Утков, Ю.С. Юсфин А.Л. Жунев, А.Г. Жунев и др., было доказано положительное влияние оксида магния не только на свойства доменных шлаков, но и на прочностные показатели агломерата. А поскольку прочность агломерата является одним из факторов, определяющих газодинамические условия доменного процесса, то правильный выбор магнийсодержащего компонента агломерационной шихты, способствующий улучшению механических свойств спека, является актуальной задачей для любого комбината с полным циклом, особенно в современных условиях частой смены сырьевых материалов.

В отечественной металлургии в основном используются добавки на основе карбонатов магния – доломит и сидероплезит, а также магнийсодержащие руды и концентраты.

Для условий работы металлургических предприятий Южного Урала использование в аглодоменном переделе сидероплезита (т.н. бакальского сидерита), эффективность вовлечения которого была доказана Б.П. Юрьевым, В.В. Шацилло, С.Г. Меламуд, И.А. Дудчук, А.Г. Жуневым, Л.И. Леонтьевым и др. является весьма характерным.

В зарубежной практике нашли применение добавки на основе силикатов магния оливинового и пироксенового составов. Использование подобных материалов на российских металлургических предприятиях не получило широкого распространения по той причине, что высокое содержание кремния вызывает в агломератах заметное снижение содержания железа. Однако, вовлечение в процесс агломерации магнезиальных добавок на основе силикатов магния обещает не только дополнить научные и практические представления о взаимодействии их в процессе спекания с магнетитовыми рудами, но также расширит сырьевую базу магнезиальных добавок для отечественных металлургических предприятий. Одним из таких предприятий может стать АО «Уральская Сталь», т.к. на территории Оренбургской области расположено Халиловское месторождение серпентинитомagneзитов.

Серпентинит с остаточным магнезитом является побочным продуктом магнезитового производства, поэтому его использование в аглодоменном переделе позволит снизить негативное влияние породных отвалов на окружающую среду.

**Цель работы** заключается в исследовании влияния вида магнезиального флюса на прочностные свойства и фазовый состав агломерата, а также в разработке технологического решения повышения прочности магнезиальных агломератов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) Проведен сравнительный анализ поведения сидероплезита Бакальского месторождения (основной магнезиальной добавки, используемой в агломерационном производстве Южного Урала) и серпентинитомгнезита Халиловского месторождения при нагреве их до температур агломерационного процесса.

2) Методами термодинамического моделирования определено влияние вида флюса на минералогический состав агломерата и дан прогноз о возможных изменениях качества готового агломерата.

3) Проведены лабораторные спекания агломератов с использованием аглоруды БРУ при разнонаправленном изменении в них содержания оксидов магния и кальция (постоянная суммарная основность  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2 = 1,75$  и  $2,0$  ед.), изучены свойства агломератов.

4) Проведены лабораторные спекания с использованием разных магнийсодержащих материалов для получения агломератов постоянной простой основности  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,5$  ед. и  $1,75$ , изучены свойства агломератов.

5) Установлена причинно-следственная связь между минералогическим составом и прочностными свойствами агломератов в зависимости от вида используемого магнийсодержащего материала, а также содержания  $\text{MgO}$  в спеке.

6) На основе проведенного исследования предложен оптимальный состав магнийсодержащего компонента аглошихты, обеспечивающий получение готового агломерата с более высокими показателями прочности относительно «базового» уровня.

#### **Научная новизна:**

1) Показано, что методом термодинамического моделирования можно выявить влияние вида флюса на минералогический состав агломерата и дать прогноз о возможных изменениях в качестве готового агломерата. Расчетным способом установлено, что замена магнийсодержащего флюса в виде сидерита на серпентинит позволяет сократить количество фазы  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , снижающей прочность агломерата. Увеличение основности модельной системы не изменяет тренд на снижение количества двухкальциевого силиката  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  при замене магнийсодержащего флюса сидерита на серпентинит.

2) Экспериментально установлено различие в механизмах формирования силикатных и ферритных связей агломерата в зависимости от вида магнезиального флюса, а также установлена взаимосвязь микроструктуры связей с холодной прочностью агломерата. Показано, что  $\text{MgO}$ , внесенный в шихту в виде бакальского сидерита, не предотвращает образование двухкальциевого силиката  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ , являющегося причиной низкой прочности офлюсованных агломератов. Использование серпентинитомгнезита, основу которого составляют силикаты магния, напротив, позволяет заметно сократить количество  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  в агломерате.

3) Выявлено, что в агломератах, полученных с добавлением серпентинита, основностью 1,5 и 1,75 с повышенным содержанием оксида магния (4%) ферриты, составляющие основу связки, кристаллизуются в форме близкой к магнетиту. Предложен механизм их формирования.

#### **Практическая значимость работы:**

1) Показана принципиальная возможность использования магнезиальных добавок на основе силикатов магния в агломерационном производстве с целью значительного упрочнения магнезиальных агломератов «критической» основности ( $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$  ед.) при сохранении содержания железа в агломерате на требуемом уровне.

2) Предложен магниесодержащий компонент агломерационной шихты, представляющий собой смесь магнезиальных материалов, при составлении которой учитывались преимущества и недостатки каждого из ее компонентов, и обеспечивающий заметное улучшение прочностных показателей спека без заметного ухудшения показателей процесса спекания.

3) Предварительные расчеты экономической эффективности исследуемых опытных технологий применительно к условиям аглодоменного передела АО «Уральская Сталь» подтвердили целесообразность использования серпентинитомagneзита как в «чистом» виде, так и в составе комбинированного флюса.

#### **На защиту выносятся:**

- результаты термодинамического моделирования минералогического состава агломерата, полученного с использованием магниесодержащих флюсов разного минералогического состава;

- результаты экспериментальных спеканий магнезиальных агломератов с использованием бакальского сидерита при разнонаправленном изменении содержания в шихте оксидов кальция и магния;

- результаты опытных спеканий магнезиальных агломератов основностей по  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$  ед. и 1,75 при изменении содержания MgO в них от 2 до 4% с использованием бакальского сидерита и серпентинитомagneзита;

- результаты опытных спеканий и исследований свойств агломератов, полученных с использованием комбинированного флюса при разном соотношении бакальского сидерита и серпентинитомagneзита в нем;

- результаты рентгеноспектрального анализа микроструктур опытных образцов, устанавливающих взаимосвязь прочностных характеристик с фазовым составом готового агломерата.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на:

- Международной научно-практической конференции «Инновационный инжиниринг технологий подготовки металлургического сырья» (г. Екатеринбург, 2015 г.);
- 74-ой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2016 г.);
- VIII Международном Конгрессе доменщиков: «Металлургия чугуна – вызовы XXI века» (г. Москва, 2016 г.).

**Связь исследований с научными программами.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по проекту № 11.2054.2017/4.6 в рамках государственного задания на 2017-2019 гг.

Опытно-промышленные испытания проводились в рамках научно-исследовательской работы «Использование магниезиальных добавок в условиях агломерационного цеха АО «Уральская Сталь» с целью полной или частичной замены сидерита БРУ» по договору № УС/17-653 от 24.04. 2017.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ. Из них 3 статьи – в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, 1 статья переведена на английский язык и опубликована в журнале, входящем в международную библиографическую базу данных «Scopus», 2 статьи опубликованы в сборниках научных трудов конференций.

**Личный вклад автора** заключается в организации и проведении лабораторных и опытно-промышленных испытаний, исследованиях микроструктур опытных образцов методами рентгеноспектрального анализа, а также в обработке, интерпретации и обобщении полученных данных. Диссертация является законченной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и пяти приложений. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 33 таблицы и 53 рисунка, список использованных источников включает 154 наименования отечественных и зарубежных авторов.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе литературных данных проанализировано влияние оксида магния на свойства шлака. Установлено, что для шлаков нормальной и повышенной

основностей ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,0 - 1,25$  ед.) оптимальное содержание  $\text{MgO}$  составляет 7-12%. Кислые шлаки ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  менее 1,0 ед.) обладают благоприятными свойствами при наличии в них 11 - 14%  $\text{MgO}$ . При этом, во всех случаях оптимальное значение суммарной основности  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$  колеблется в пределах 1,30 – 1,45. Самым эффективным способом ввода  $\text{MgO}$  в доменную печь является использование магнезильного агломерата.

В этой же главе по данным исследований, отраженных в литературе, проанализировано влияние магнезии на свойства и структуру агломерата. Установлено, что  $\text{MgO}$  может входить как в состав рудной части, так и в силикатную связку. При этом улучшение прочностных характеристик магнезиальных агломератов может происходить либо за счет образования мелкозернистой структуры рудных зерен, представленных магномагнетитом, магнезиоферритом и магнезиовюститом, отличающихся низкой восстановимостью, либо за счет химической стабилизации двухкальциевого силиката, основанной на образовании силикатных соединений типа мервинита вместо  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ . По данным литературных источников  $\text{MgO}$  подавляет ферритообразование, поэтому механизм упрочнения агломерата за счет образования в его структуре алюмосиликоферритов или ферритов кальция носит ограниченный характер.

Использование тех или иных магнийсодержащих материалов в процессе агломерации предопределяет в первую очередь изменение расхода топлива или основности агломерата. Так, было установлено, что:

1) использование в агломерационном производстве магнийсодержащих руд и концентратов обуславливает работу преимущественно с высоким расходом известняка, наличие которого обеспечивает достаточное развитие процессов расплавообразования при оптимальном расходе топлива;

2) при добавлении в шихту магнезиальных карбонатсодержащих материалов (доломит, магнезит и т.д.) существует необходимость в повышении расхода топлива для компенсации тепловых затрат на разложение карбонатов;

3) Магнийсодержащие добавки оливинового и пироксенового составов не требуют повышенного расхода топлива, однако для обеспечения требуемой основности доменных шлаков необходимо увеличивать расход известняка. Кроме того, высокое содержание кремнезема в таких материалах предопределяет снижение общего содержания железа в агломератах.

Выполненный анализ литературных данных обосновывает необходимость исследования влияния вида флюса на свойства и фазовый состав агломерата с целью получения продукта более высокого качества при учете преимуществ и недостатков используемых магнезиальных материалов.

Во второй главе дана краткая характеристика материалов и методов, выбранных для исследования.

При планировании экспериментов воспроизводились условия работы агломерационного производства АО «Уральская Сталь», а эффективность применения различных магниезальных добавок изучали сопоставлением результатов опытных спеканий.

Химический состав основных компонентов шихты, используемых при проведении экспериментов, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав основных компонентов экспериментальной аглошихты

Наименование вида сырья	Химический состав, %										
	Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ппп
Аглоруда Михайловская	53,10	8,33	66,6	14,8	1,73	1,27	0,54	0,056	0,42	0,059	4,79
Концентрат МихГОК	64,60	25,64	63,8	8,5	0,79	0,38	0,68	0,036	0,013	0,059	
отсев агломерата (возврат)	Определялся по результатам предыдущих опытов										
Известняк	1,3	0,02	1,84	0,9	53,8	0,19	0,65	0	0,012	0,046	42,05
Известь	1,64	0,00	2,34	1,11	75,67	0,25	0,80	0,00	0,018	0,06	20,41
Твердое топливо											
коксовая мелочь: доменная	Углерод – 84 %				Зола - 13,0 %			Сера - 0,5 %			
Зола коксика	8,51		12,16	46	7,4	15	3,15	0,72	1,36		

Возможность использования серпентинитомagneзитов в аглопроизводстве предварительно оценивалась на основе сравнительного анализа его химического состава с химическим составом бакальского сидерита (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав магнийсодержащих материалов

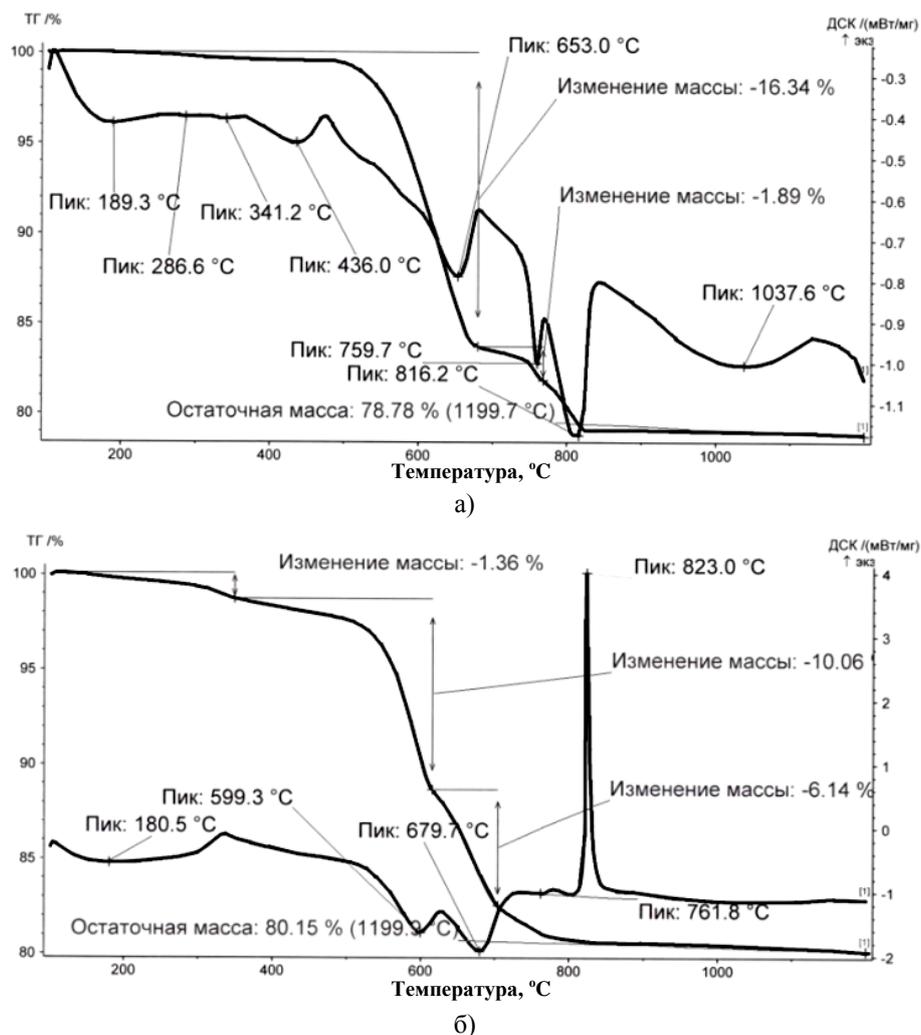
Материал	Химический состав (по массе), %									
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	S+P	п.п. п	
Бакальский сидерит (Fe,Mg)CO <sub>3</sub>	28-30	34-38	5-0,5	9-13	3,5-5	2,5 -11	1-2	0,15-0,35	33-36	
	29,5	34,42	5,15	9,31	4,20	10,50	0,93	0,23	35,53	
Серпентинитомagneзит Mg <sub>6</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ]OH <sub>6</sub>	4-7	5-8		35-40	0,05-1,2	36-40	0-0,15	0,03-0,05	13-16	
	7,8	9,6		33,0	1,1	33,3	0,12	0,032	15,1	

Примечание: в числителе общий состав, в знаменателе – используемый при проведении экспериментов.

Целью термогравиметрического анализа является определение вида, в котором магнийсодержащая добавка попадает в зону высоких температур при агломерации.

Нагрев материалов осуществлялся в интервале температур 100 – 1200 °С со скоростью нагрева 20 °С/мин, в нейтральной и окислительной средах. На рисунке 1 представлены термограммы для случая с окислительной средой.

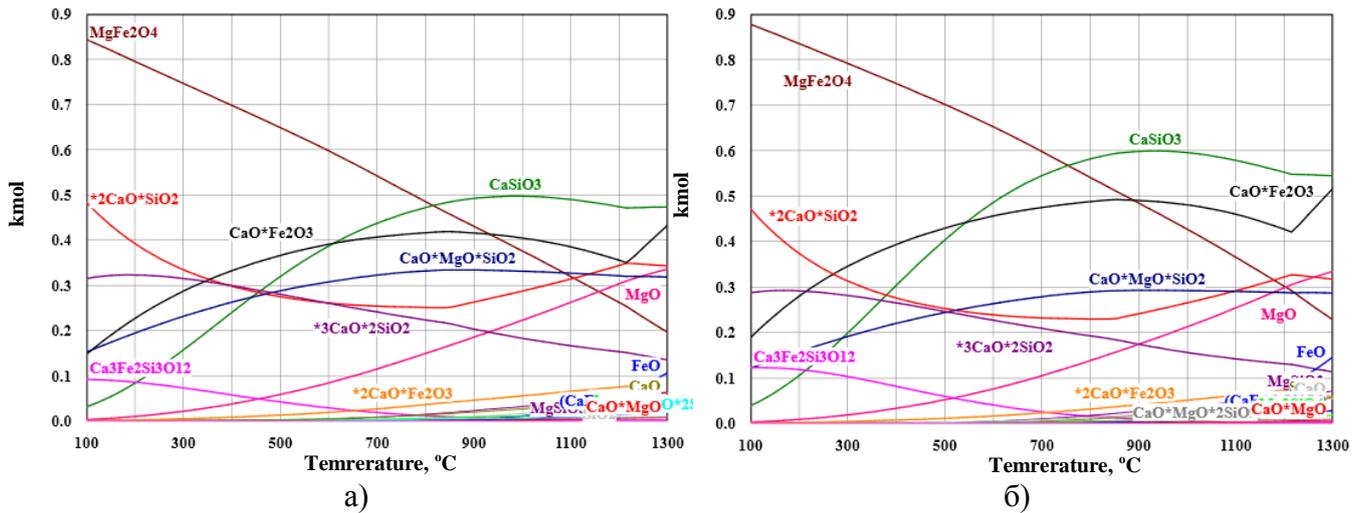
Термогравиметрический анализ позволил выявить следующее: в зоне высоких температур при формировании расплава бакальская аглоруда вносит магний в виде в виде магнезиоферрита и оксида магния с ориентировочным соотношением 8:2. Серпентинитомagneзит в зоне высоких температур превращается в смесь форстерита, энстантита и оксида магния с ориентировочным соотношением 6:6:5.



**Рисунок 1** - Поведение бакальского сидерита (а) и серпентинитомagneзита (б) при нагреве в окислительной среде

**Третья глава** посвящена методам термодинамического моделирования, позволяющим определить влияние вида флюса на минералогический состав агломерата и дать прогноз о возможных изменениях в качестве готового агломерата.

В качестве флюса в модели использовались минералы сидерит  $(\text{FeMg})_{0,5}\text{CO}_3$  и серпентинит  $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . В качестве модели исходной шихты во всех расчетах использовалась смесь следующего химического состава:  $\text{SiO}_2=9,45\%$ ;  $\text{CaO}=14,20\%$ ;  $\text{FeO}=12,18\%$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3=61,42\%$ , в которую вводили магниальный флюс в количестве 2, 4 и 6%  $\text{MgO}$ , что соответствовало содержанию основных компонентов экспериментальной агломерационной шихты.



**Рисунок 2** – Зависимость равновесного количества конденсированных фаз от температуры модельного состава шихты с 4% MgO в виде сидерита (а) и серпентинита (б) при охлаждении на воздухе

Расчеты, выполненные с использованием программного комплекса HSC Chemistry 6.1, позволили установить, что замена магнийсодержащего флюса в виде сидерита на серпентинит позволяет сократить количество фазы  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , снижающей прочность агломерата, а увеличение основности модельной системы не изменяет тренд на снижение количества двухкальциевого силиката  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  при замене магнийсодержащего флюса сидерит на серпентинит. Характерное распределение равновесных фаз при охлаждении модельной системы агломерата представлено на рисунке 2, а в таблице 3 представлены расчетные значения содержания  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  и суммы силикатных фаз модельного агломерата.

Таблица 3 - Расчетное содержание силикатных фаз в модельном агломерате при охлаждении

Содержание MgO в агломерате, %	Вид флюса	Фаза, кмоль	Температура агломерата, °C		
			700	500	100
$\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,5$ ед.					
2,0	Флюс- бакал. сидерит	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,	0,327	0,358	0,714
		Силикаты	1,991/1,245*	1,897/1,144	1,565/1,105
	Флюс- серпентинит	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,	0,244	0,254	0,457
		Силикаты	1,505/1,440*	1,360/1,233	1,132/0,902
4,0	Флюс- бакал. сидерит	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,	0,254	0,273	0,483
		Силикаты	1,294/1,274	1,215/1,185	1,076/0,983
	Флюс- серпентинит	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,	0,232	0,251	0,472
		Силикаты	1,313/1,286	1,217/1,159	1,043/0,920
6,0	Флюс- бакал. сидерит	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,	0,259	0,285	0,503
		Силикаты	2,147/1,337	2,232/1,262	2,391/1,090
	Флюс- серпентинит	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,	0,236	0,260	0,494
		Силикаты	1,335/1,260	1,257/1,053	1,092/0,515

\*Примечание - в числителе сумма всех силикатов, в знаменателе - без учёта железосодержащих

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных спеканий магниальных агломератов с использованием бакальского сидерита при

разнонаправленном изменении содержания в шихте оксидов кальция и магния (постоянная суммарная основность) и при постоянстве содержания оксида кальция и повышении содержания магния (постоянная простая основность).

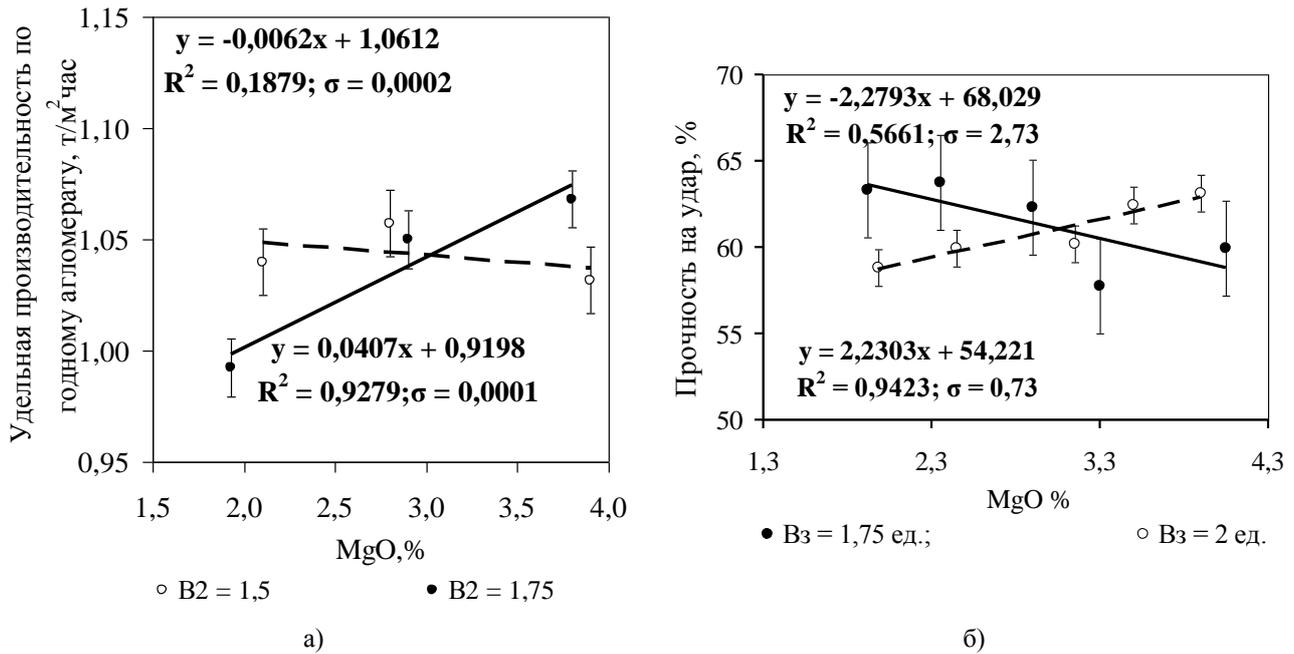
Условия проведения экспериментов для серии спеканий агломератов постоянной суммарной основности ( $V_3$  или  $(CaO+MgO)/SiO_2$ ) представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Условия проведения опытных спеканий при разнонаправленном изменении содержания в шихте оксидов кальция и магния

Параметры	Значения параметров по опытам с расчетным содержанием MgO (%)*				
	2	2,5	3	3,5	4
1	2	3	4	5	6
Расчетное содержание железа в агломерате, %	52/51	51,5/50,5	51/50	50,5/49,5	50/49
Расчетная основность $(CaO+MgO)/SiO_2$ , ед.	1,75/2,0				
Расчетная основность $CaO/SiO_2$ , ед.	1,54/1,78	1,49/1,73	1,44/1,68	1,40/1,63	1,35/1,59
Содержание углерода, %	4,25/4,45	4,25/4,45	4,3/4,5	4,3/4,5	4,3/4,5
Расход компонентов аглошихты, кг/т: концентрат МГОКа	545,05/554,30	495,60/514,77	459,84/478,07	407,92/435,48	366,93/393,12
аглоруда МГОКа	194,39/161,91	210,48/174,91	221,81/186,98	229,92/200,54	245,57/212,64
возврат	329,91/327,37	326,33/324,53	323,71/321,89	319,00/318,77	316,29/315,52
аглоруда БРУ (бакальский сидерит)	111,68/112,72	180,07/174,54	226,13/222,63	314,76/279,12	367,16/335,60
известняк	272,95/253,40	215,67/247,84	209,94/242,69	201,34/236,62	195,13/232,88
коксик	59,78/60,39	61,81/61,03	61,81/61,62	62,91/62,95	63,91/63,69

Примечание - в числителе значения для расчетной основности  $V_3 = 1,75$ ; в знаменателе – 2,0

Влияние изменений содержания MgO и  $CaO/SiO_2$  в агломерате на показатели удельной производительности по годному после сбрасывания и его прочностные характеристики приведены на рисунке 3.



**Рисунок 3** – Влияние содержания MgO на удельную производительность по годовому агломерату (а) и прочность спека (б) при разнонаправленном изменении содержания в шихте оксидов кальция и магния

Таким образом, было выявлено, что экспериментальные спекания агломератов при постоянной суммарной основности (разнонаправленном изменении содержания в них оксидов кальция и магния) методически не целесообразны для проведения исследований по изучению влияния оксида магния на металлургические свойства, так как трудно выделить роль каждого оксида при формировании спека. Тем не менее, эти эксперименты позволили установить, что увеличение содержания MgO при одновременном снижении содержания CaO/SiO<sub>2</sub> менее 1,5 негативно сказывается на прочностных характеристиках спека, выходе годного, а также удельной производительности по годовому агломерату (после сбрасывания). Поэтому при использовании в качестве магнезиальной добавки бакальских сидеритов было рекомендовано производство агломератов основностью по CaO/SiO<sub>2</sub> не менее 1,5 ед.

Для более детального исследования влияния на прочностные свойства оксида магния, вносимого в агломерационную шихту в виде аглоруды БРУ, также были проведены спекания в условиях постоянной простой основности (CaO/SiO<sub>2</sub>) (таблица 5). Полученные результаты сведены в таблицу 6.

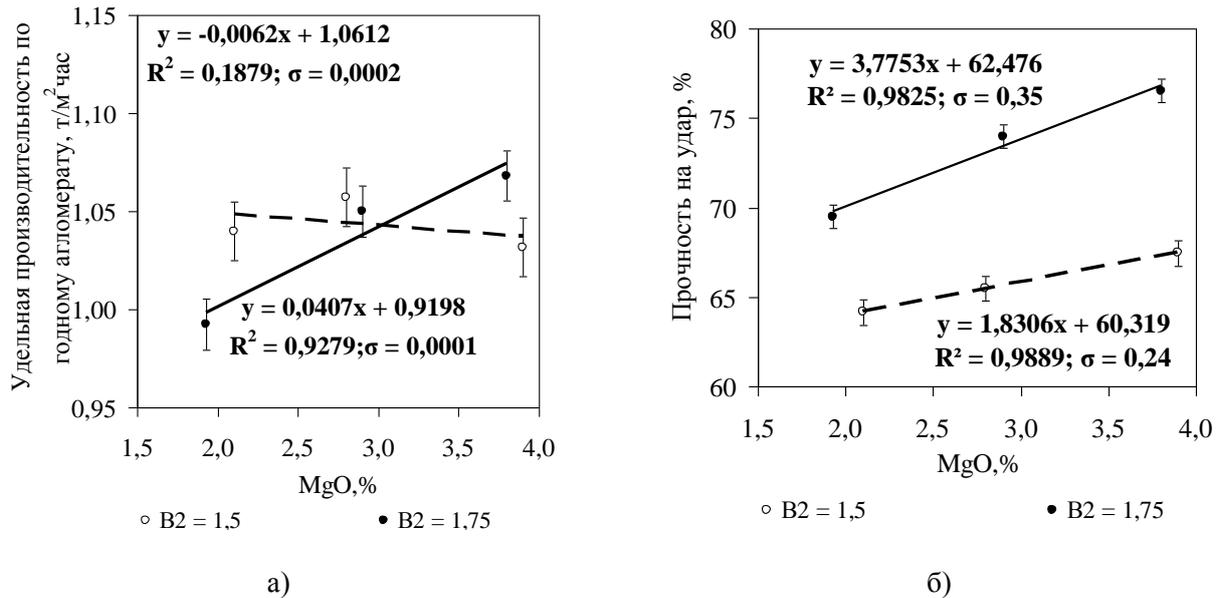
Таблица 5 - Условия проведения экспериментов с использованием сидерита Бакальского рудоуправления (БРУ) при постоянной простой основности агломерата

Показатели	Значения по опытам					
	1БС	2БС	3БС	4БС	5БС	6БС
Расчетная основность агломерата CaO/SiO <sub>2</sub>	1,5			1,75		
Расчетное содержание MgO в агломерате, %	2	3	4	2	3	4
Расчетное содержание Fe в агломерате, %	52	51	50	51	50	49
Содержание углерода, %	4,3					
Расход компонентов аглошихты, кг/т: концентрат МГОКа	579,48	569,89	560,88	589,47	580,98	572,40
аглоруда МГОКа	137,25	68,63	4,19	115,30	50,03	0
возврат	327,40	318,89	310,91	326,09	318,06	309,25
аглоруда БРУ	138,50	258,60	371,78	128,35	241,22	363,35
известняк	220,48	217,44	214,58	252,66	250,18	249,56
коксик	57,35	58,54	59,65	58,35	59,48	60,74

Экспериментальные спекания показали, что при постоянном содержании CaO и увеличении содержания MgO прочностные свойства спека улучшаются (таблица 6, рисунок 4,б), выход годного и удельная производительность по годному агломерату (после сбрасывания) увеличиваются (таблица 6, рисунок 4,а), несмотря на снижение скорости спекания (таблица 6). Наилучшие показатели процесса спекания и качества агломерата наблюдаются в случае с CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,75 ед.

Таблица 6 – Усредненные результаты опытных спеканий с использованием аглоруды БРУ

Показатели	Значения по опытам						
	1БС	2БС	3БС	4БС	5БС	6БС	
Фактическая основность агломерата CaO/SiO <sub>2</sub>	1,46	1,47	1,49	1,73	1,77	1,77	
Фактическое содержание MgO в агломерате, %	2,10	3,20	3,80	2,0	3,03	3,90	
Фактическое содержание Fe в агломерате, %	52,5	50,70	50,45	50,70	50,37	50,50	
Содержание мелочи 0-1 мм в окомкованной шихте, %	2,30	2,40	2,46	2,07	2,02	1,89	
Эквивалентный диаметр гранул окомкованной шихты, мм	4,60	4,35	4,26	4,74	4,76	4,79	
Потери при прокаливании аглошихты, %	11,73	12,60	14,74	12,96	14,30	16,00	
Относительная усадка слоя, %	11,33	12,17	13,59	12,90	11,36	11,00	
Скорость спекания мм/мин	17,45	15,86	15,45	15,85	15,32	14,93	
Удельная производительность по годному агломерату, т/м <sup>2</sup> ·час	1,040	1,057	1,032	0,992	1,050	1,068	
Выход годного агломерата, %	70,79	74,78	75,72	72,92	80,13	83,66	
Прочность спека на сбрасывание, %	83,04	83,03	83,78	84,78	86,26	86,61	
Прочность агломерата, %	на удар	64,15	65,47	67,45	69,50	73,97	76,54
	на истирание	5,56	5,23	5,30	6,18	5,53	5,40



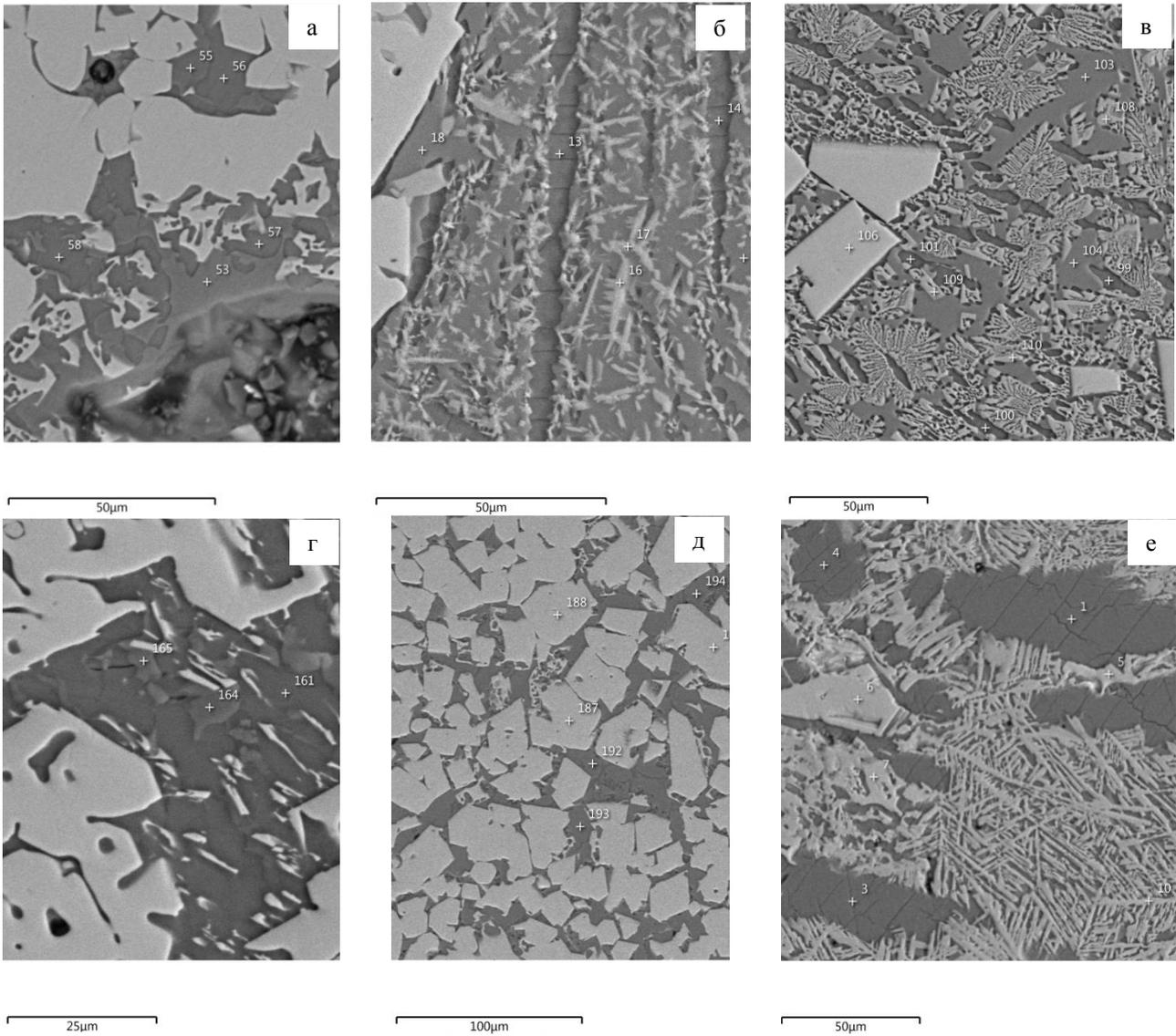
**Рисунок 4** - Влияние содержания MgO на удельную производительность по одному агломерату (а) и прочность спека (б) при постоянстве содержания оксида кальция и повышении содержания магния

Анализ микроструктуры агломератов состава MgO=2% и CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,5 ед. подтвердил гипотезу о наличии в их структуре двухкальциевого силиката, являющегося основной причиной минимальной прочности таких агломератов (прочность на удар 64,1%, на истирание – 5,6%).

Предпосылкой для образования β-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> в структуре агломерата является разделение силикатного расплава при кристаллизации на низко- и высокоосновный (рисунок 5,а)

Увеличение содержания магнезии в спеке до 3 и 4% способствует развитию процессов ферритообразования, оказывающих заметное положительное влияние на прочностные показатели (рисунок 5, б, в).

В агломератах более высокой основности при низком содержании MgO (CaO/SiO<sub>2</sub>= 1,75 ед. MgO = 2%) сохраняется разделение расплава при кристаллизации на низко- и высокоосновный, однако количество высокоосновной стеклофазы заметно возрастает и ее основность снижается с 1,7 - 1,8 ед. до 1,2 – 1,3 ед. (рисунок 5, г, д), что способствует сокращению доли двухкальциевого силиката β-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> в его структуре.



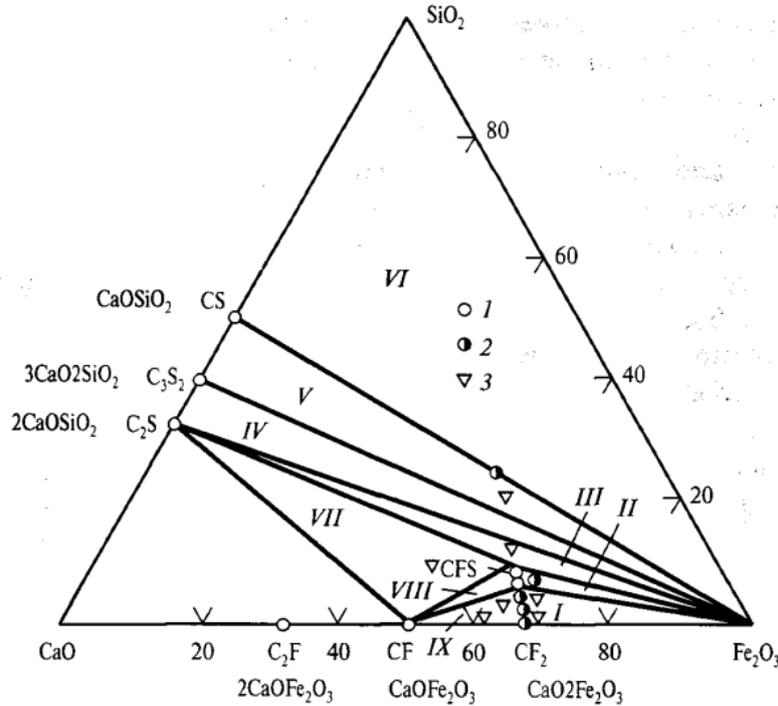
**Рисунок 5** - Микроструктура агломератов, полученных с использованием бакальских сидеритов:

а)  $\text{MgO} = 2\%$ ,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,5$ ; б)  $\text{MgO} = 3\%$ ,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,5$ ; в)  $\text{MgO} = 4\%$ ,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,5$ ;  
 г)  $\text{MgO} = 2\%$ ,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,75$ ; д)  $\text{MgO} = 4\%$ ,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,75$ ; е)  $\text{MgO} = 4\%$ ,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,75$ .

Спектры: 106,187,188, 5-7 – магнетит; 53,55,18,103,104,164,165 – низкоосновная стеклофаза ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  менее 1,0 ед.); 56-58 – высокоосновная стеклофаза ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,7 - 1,8$  ед.), склонная к кристаллизации в форме  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ; 13, 99-101,1,3,4 – двухкальциевый силикат  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ; 16,17,108-110,10 – феррит; 161 – высокоосновная стеклофаза ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,25 - 1,35$  ед.), 192-194 - высокоосновная стеклофаза ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,45 - 1,55$  ед.).

Отличительной особенностью микроструктуры агломератов с содержанием  $\text{MgO} = 4\%$  ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,75$  ед., рисунок 5, е) является более интенсивное ферритообразование, причем образовавшиеся ферриты дендритной формы занимают больший объем между рудными зернами в отличие от характерной структуры для агломерата  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,5$  ед. и  $\text{MgO} = 4\%$  (рисунок 5, в).

Для объяснения механизма минералообразования в агломерате, полученного с использованием в качестве магнезиального флюса бакальского сидерита, использовалась диаграмма состояния  $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (рисунок 6).



**Рисунок 6** – Изотермическое сечение диаграммы состояния  $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  при температуре  $1230^\circ\text{C}$ :

1 – однофазный, 2-двухфазный, 3-трехфазный составы;  
 области: I- $\text{CF}_2+\text{CFS}+\text{F}$ ; II –  $\text{CFS}+\text{F}$ ; III –  $\text{CFS}+\text{F}+\text{C}_2\text{S}$ ; IV –  $\text{C}_2\text{S}+\text{C}_2\text{S}_3+\text{F}$ ; V –  $\text{C}_3\text{S}_2+\text{F}+\text{CS}$ ; VI –  $\text{CS}+\text{F}+\text{SiO}_2$ ; VII –  $\text{CF}+\text{CF}_2+\text{C}_2\text{S}$ ; VIII –  $\text{CF}+\text{CFS}$ ; IX –  $\text{CF}+\text{CFS}+\text{CF}_2$ ;  
 обозначения: C – CaO; F –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; S –  $\text{SiO}_2$ .

Согласно данной диаграмме, наиболее вероятно, что область кристаллизации части расплава при увеличении содержания магния смещается из области IV ( $\text{C}_2\text{S}+\text{C}_2\text{S}_3+\text{F}$ ) в область III ( $\text{CFS}+\text{F}+\text{C}_2\text{S}$ ), а часть расплава обедненная кальцием смещается в область кристаллизации V –  $\text{C}_3\text{S}_2+\text{F}+\text{CS}$ .

**В пятой главе** отражены результаты исследований свойств агломератов постоянной простой основности ( $\text{B}_2$ ), полученных с использованием серпентититомагнезита.

В таблице 7 представлены условия проведения экспериментов. В таблице 8 – полученные результаты, на основе которых было установлено положительное влияние экспериментальной добавки на барабанную прочность агломерата, как в случае с основностью по  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$  так и 1,75 ед. (рисунок 7,б). При этом, с ростом содержания  $\text{MgO}$  было отмечено ухудшение показателей процесса спекания - скорости спекания, выхода годного, прочности на сбрасывание и удельной производительности (таблица 8, рисунок 7,а),

что обусловлено ухудшением условий расплавообразования в верхних слоях спекаемой шихты.

Таблица 7 - Условия опытных спеканий с серпентинитомagnesитом (СМ)

Показатели	Значения по опытам					
	1СМ	2СМ	3СМ	4СМ	5СМ	6СМ
Расчетная основность агломерата CaO/SiO <sub>2</sub>	1,5			1,75		
Расчетное содержание MgO в агломерате, %	2	3	4	2	3	4
Расчетное содержание Fe в агломерате, %	52	51	50	51	50	49
Содержание углерода, %	4,25					
Расход компонентов аглошихты, кг/т:						
концентрат МГОКа	652,4	706,6	696,6	740,7	712,9	686,3
аглоруда МГОКа	118,2	32,5	11,9	17,9	7,0	1,1
возврат	333,2	329,6	326,4	327,6	324,1	323,6
серпентинитомagnesит	36,5	68,0	97,3	30,9	67,8	97,1
известняк	232,7	240,3	256,6	251,1	274,0	295,5
коксик	55,5	55,6	56,0	56,7	57,3	57,8

Таблица 8 - Усредненные результаты опытных спеканий с серпентинитомagnesитом

Показатели	Значения по опытам						
	1СМ	2СМ	3СМ	4СМ	5СМ	6СМ	
Фактическая основность агломерата CaO/SiO <sub>2</sub>	1,46	1,50	1,59	1,74	1,70	1,78	
Фактическое содержание MgO в агломерате, %	2,10	2,80	3,90	1,93	2,90	3,80	
Фактическое содержание Fe в агломерате, %	53,00	52,10	50,20	51,20	50,70	50,50	
Содержание мелочи 0-1 мм в окомкованной шихте, %	2,27	1,84	1,62	2,35	2,06	1,39	
Эквивалентный диаметр гранул окомкованной шихты, мм	4,64	5,16	5,86	4,96	5,49	5,91	
Потери при прокаливании аглошихты, %	8,46	8,64	8,99	9,27	9,48	10,26	
Относительная усадка слоя, %	6,57	6,57	6,18	8,66	7,94	7,58	
Скорость спекания мм/мин	14,58	14,58	13,33	15,95	16,19	12,69	
Удельная производительность по годному агломерату, т/м <sup>2</sup> ·час	0,956	0,934	0,764	1,183	1,177	0,855	
Выход годного агломерата, %	76,95	75,13	66,15	80,21	80,21	73,68	
Прочность спека на сбрасывание, %	86,03	86,11	85,06	89,41	88,97	87,08	
Прочность агломерата, %	на удар	76,00	77,15	80,70	77,30	80,90	82,90
	на истирание	5,30	4,55	3,88	5,40	4,90	4,71

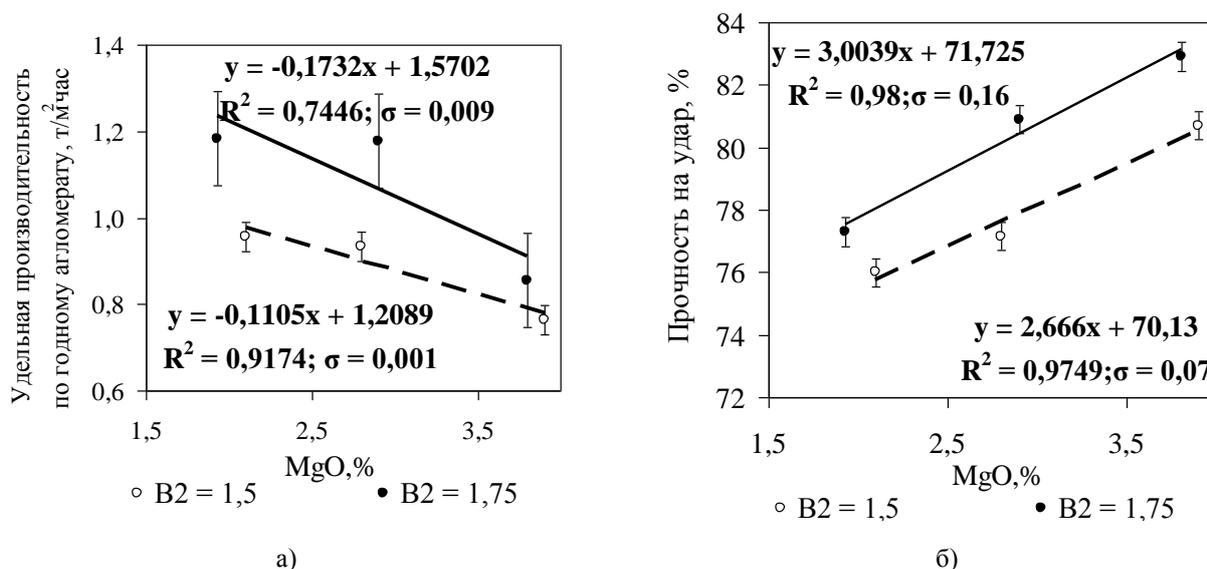
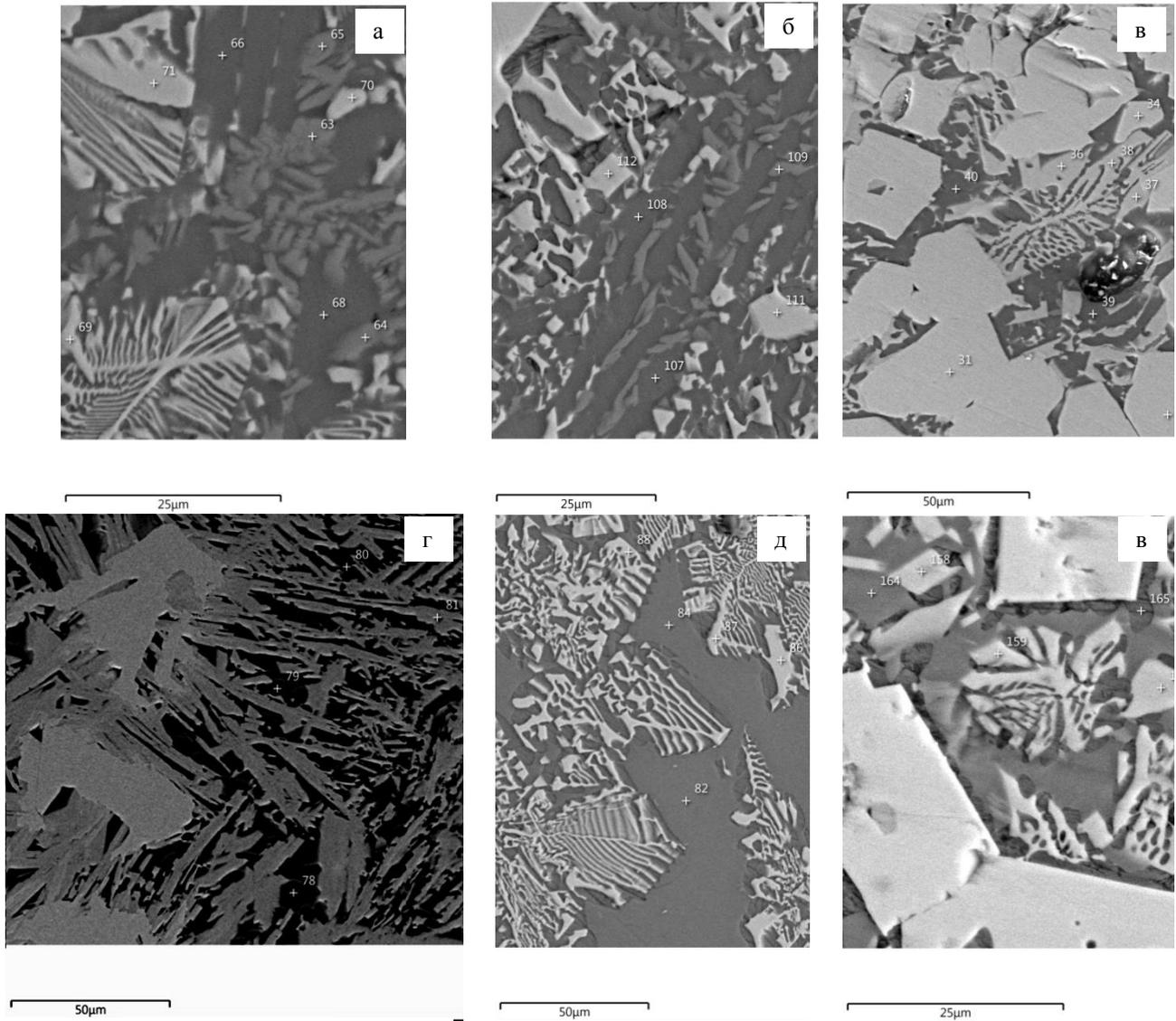


Рисунок 7 - Влияние содержания MgO на удельную производительность по годному агломерату (а) и прочность спека (б) при использовании серпентинитомagnesита в качестве магниальной добавки

На основе анализа микроструктур опытных агломератов, было установлено, что связка рудных зерен «серпентинитовых» образцов представлена преимущественно стеклофазой ранкинитового состава, причем по границам ее продолговатых форм образуются кристаллы твердых растворов на основе ферроокерманита  $\text{Ca}_2\text{FeSi}_2\text{O}_7$  (рисунок 8,а)



**Рисунок 8 - Микроструктура агломератов, полученных с использованием серпентинитомagnesита:**

а)  $\text{MgO} = 2\%$ ,  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$ ; б)  $\text{MgO} = 3\%$ ,  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$ ; в)  $\text{MgO} = 4\%$ ,  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$ ;  
 г)  $\text{MgO} = 2\%$ ,  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$ ; д)  $\text{MgO} = 4\%$ ,  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$ ; е)  $\text{MgO} = 4\%$ ,  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$ .  
 Спектры: 69-71,111,112,31,34,86-88 – магнетит; 82,84,164– низкоосновная стеклофаза ( $\text{CaO/SiO}_2$  менее 1,0 ед.); 78-80,165– двухкальциевый силикат  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ; 36-38,81,158,159 – феррит;  
 66,68,107,108,39,40 – стеклофаза ранкинитового состава ( $\text{CaO/SiO}_2 = 1,30 - 1,40$  ед.),  
 63-65,109 – твердый раствор ферроокерманита.

С увеличением содержания  $\text{MgO}$  в агломерате до 3% тенденция к образованию твердых растворов на основе ферроокерманита и стеклофазы ранкинитового состава

сохраняется, но при этом доля магнетита, выкристаллизовавшегося из расплава, заметно возрастает, что также способствует повышению прочности агломерата, т.к. в этом случае вторичный магнетит совместно с ферроокерманитом препятствуют распространению трещин вместо ферритов (рисунок 8, б).

В агломератах, содержащих 4% оксида магния, основными микроструктурными компонентами становятся мелкие зерна первичного магнетита, вторичный магнетит и ферриты (рисунок 8, в), а доля силикатной связки значительно сокращается.

Агломерат более высокой основности, но с низким содержанием MgO ( $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$ ,  $\text{MgO} = 2\%$ ) обладает достаточно высокими показателями прочности (в сравнении с «базовым» вариантом (1БС)), т.к. в его структуре присутствует прочная ферритная связка, способная нивелировать негативное влияние двухкальциевого силиката (рисунок 8, г).

С ростом содержания MgO в спеке до 3% также как в случае с  $B_2 = 1,5$  ед. в микроструктуре агломерата возрастает доля вторичного магнетита и ферритов (рисунок 8, д).

С увеличением содержания MgO в агломерате до 4% также, как и в случае с агломератами меньшей основности происходит дальнейший рост доли ферритов и мелкозернистого магнетита (рисунок 8, е). Отдельно следует отметить, что по своей морфологии ферриты агломератов состава  $\text{MgO} = 4\%$   $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$  схожи с ферритами агломератов меньшей основности с таким же содержанием оксида магния, что указывает на подобие механизма ферритообразования.

Наиболее вероятным механизмом образования подобных форм ферритов в данном случае является то, что по мере растворения закиси железа в полукальциевом феррите образуются твердые растворы феррита с FeO с последующим изменением их кристаллической структуры. Кристаллы этих твердых растворов относятся к гексагональной сингонии со структурой типа гексаферритов  $2\text{CaO} \cdot 2\text{FeO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ , имеющих в своей кристаллической решетке фрагменты структуры шпинели - магнетита. Замещение иона двухвалентного железа на магний приводит к повышению температуры кристаллизации и, соответственно, более быстрой кристаллизации твердого раствора на основании полукальциевого феррита в магнетитоподобной форме и стабилизации его кристаллической структуры. Способность активного ферритообразования на основе полукальциевого феррита приводит к незначительному содержанию в структуре двухкальциевого силиката.

Сравнивая изменение микроструктур агломератов, офлюсованных бакальским сидеритом и серпентиномагнезитом, можно утверждать, что серпентиномагнезит активно подавляет образование двухкальциевого силиката из расплава и способствует выделению из расплава кристаллических фаз: при основности  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$  и содержании оксида магния

до 3% в виде ферроокерманита, при 4% оксида магния в виде ферритов. При повышении основности до  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$  во всем исследованном диапазоне содержания оксида магния серпентинитомгнезит способствует кристаллизации из расплава ферритов кальция.

На основании полученных расчетных и экспериментальных данных был сделан вывод о возможном совместном использовании бакальского сидерита и серпентинитомгнезита в агломерационном процессе. Предварительные расчеты показали, что оптимальным соотношением компонентов (в тепловом отношении) является 1/4, где на одну часть серпентинитомгнезита приходится четыре части сидерита.

При составлении плана экспериментов (таблица 9) химический состав готового агломерата принимался «базовый» (2% MgO и  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$ ), т.к. экспериментально было установлено, что агломераты такого состава отличаются минимальными показателями прочности. Содержание серпентинитомгнезита в магниевой смеси изменялось от 0 до 20% с шагом 5%.

Таблица 9 – Условия проведения экспериментов с комбинированным магниевым флюсом

Параметры	Значения по опытам*			
	СМ-5	СМ-10	СМ-15	СМ-20
MgO в агломерате, %	2,0			
CaO/SiO <sub>2</sub> , ед.	1,5			
Fe в агломерате, %	52,0			
Содержание серпентинитомгнезита в смеси, %	5	10	15	20
Содержание углерода, %	4,3	4,25		
Расход компонентов аглошихты, кг/т: концентрат МГОКа	607,6	614,5	620,0	624,6
аглоруда МГОКа	119,8	119,4	119,2	119,0
возврат и отсев	328,5	329,2	329,8	330,3
Известняк	223,1	224,5	225,7	226,7
Коксик	57,20	57,00	56,90	56,80
Аглоруда БРУ	113,4	96,2	83,3	70,8
Серпентинитомгнезит	5,8	10,5	14,2	17,3

Примечание - условия проведения спеканий с комбинированным флюсом при содержании в нем 0% серпентинитомгнезита соответствуют условиям эксперимента 1БС (табл.5)

Эксперименты с комбинированным магниевым флюсом, представляющим собой смесь бакальского сидерита и серпентинитомгнезита в разных соотношениях, показали, что прочностные характеристики готового агломерата заметно улучшаются в сравнении с «базовым» агломератом - 1БС (таблица 10, рисунок 9, б). Также было установлено оптимальное соотношение бакальского сидерита и серпентинитомгнезита в магниевой смеси, которое составляет 90:10, соответственно (СМ-10). Использование таких смесей способствует упрочнению агломерата без заметного ухудшения показателей процесса спекания.

Таблица 10 – Усредненные результаты опытных спеканий с комбинированным магнезиальным флюсом

Показатели	Значения по опытам				
	СМ-5	СМ-10	СМ-15	СМ-20	
Фактическая основность агломерата CaO/SiO <sub>2</sub> (B <sub>2</sub> )	1,57	1,59	1,58	1,56	
Фактическое содержание MgO в агломерате, %	2,1	2,0	2,3	2,3	
Фактическое содержание Fe в агломерате, %	52,1	52,2	52,2	52,1	
Содержание мелочи 0-1 мм в окомкованной шихте, %	3,34	2,02	0,96	1,36	
Эквивалентный диаметр гранул окомкованной шихты, мм	4,43	4,88	5,51	5,26	
Потери при прокаливании аглошихты, %	10,69	10,48	10,17	9,98	
Относительная усадка слоя, %	10,23	10,47	8,76	7,0	
Скорость спекания мм/мин	18,05	16,83	16,19	14,91	
Удельная производительность по годному агломерату, т/м <sup>2</sup> ·час	1,040	1,057	1,032	0,992	
Выход годного агломерата, %	73,05	75,79	72,33	75,17	
Прочность спека на сбрасывание, %	85,38	84,94	86,04	86,07	
Прочность агломерата, %	на удар	67,0	72,0	71,9	72,7
	на истирание	5,49	5,30	5,11	4,90

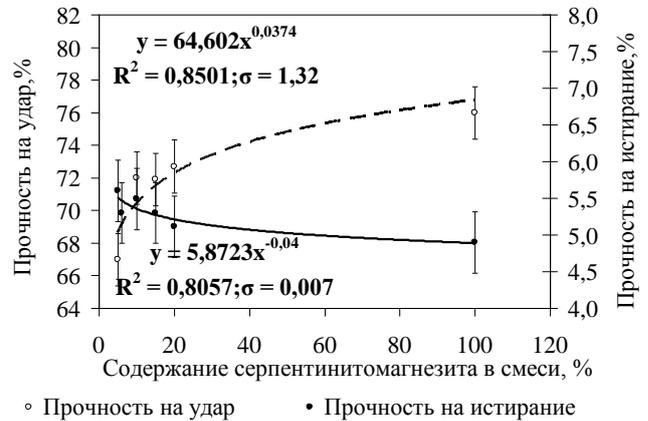
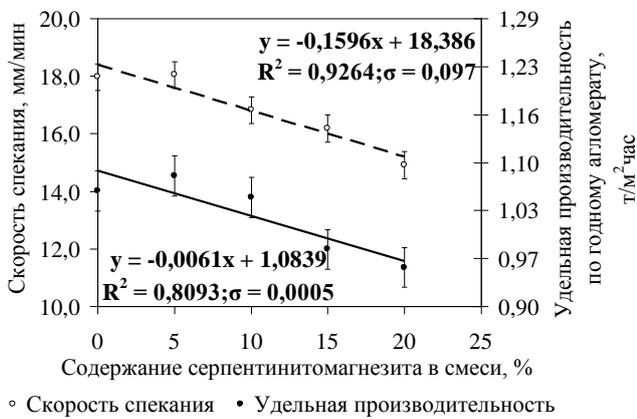


Рисунок 9 – Показатели процесса спекания и прочности агломерата при использовании комбинированного флюса с разным содержанием серпентинитомгнезита в нем

Оценка показателей восстановимости агломератов (рисунок 10) и их прочности при восстановлении (таблица 11) подтвердила целесообразность использования комбинированного флюса СМ-10 в качестве магнийсодержащего компонента агломерационной шихты при производстве магнезиального агломерата.

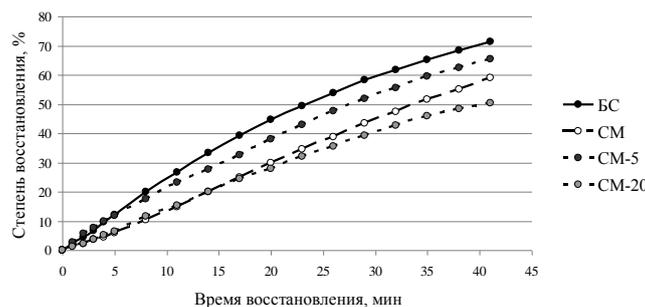
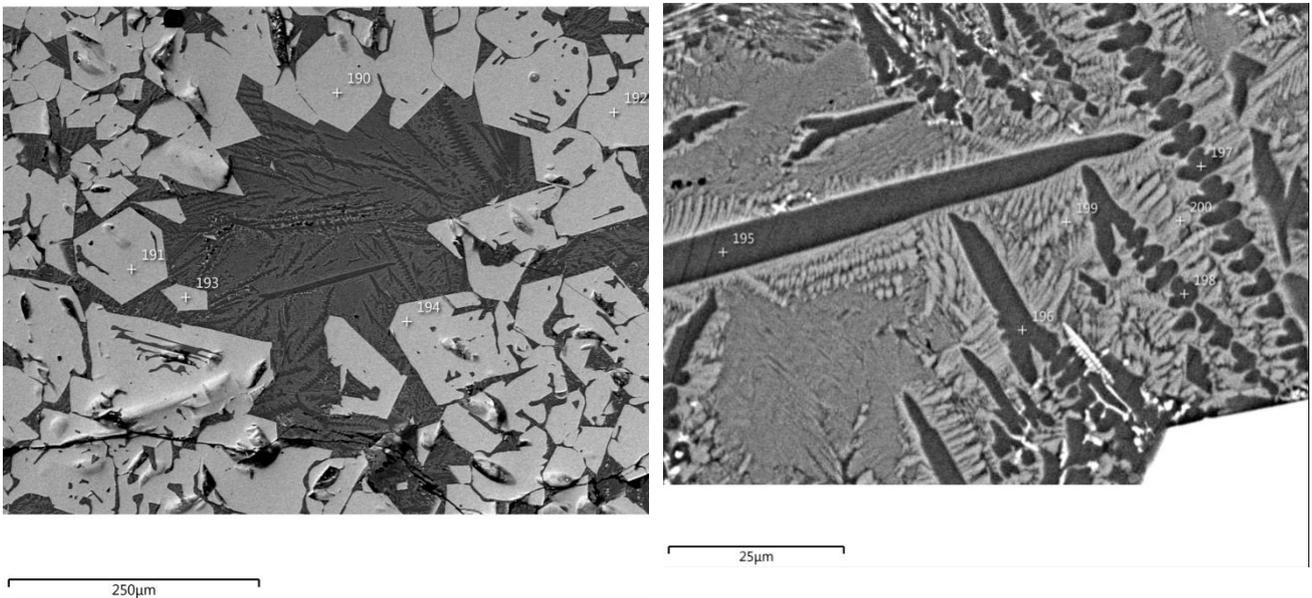


Рисунок 10 – Показатели восстановимости опытных образцов «базового» химического состава, полученных с использованием разных магнийсодержащих материалов

Таблица 11 – Показатели прочности проб опытных агломератов при восстановлении

Показатель	Значения по опытам, %			
	БС	СМ-5	СМ-10	СМ
RDI +10	53,7	54,4	60,7	62,1
RDI +5	90,2	90,4	92,3	87,5
RDI -0.5	2,42	2,35	2,0	1,7

Следует отметить, что применение в составе комбинированного флюса серпентинитомagnesита позволяет использовать его способность к преобразованию гетерогенного расплава, характерного для микроструктуры «сидеритовых» агломератов, в гомогенный расплав ранкинитового состава, кристаллизация которого сопровождается образованием твердых растворов на основе ферроокерманита, выполняющего роль носителя прочности при отсутствии ферритов (рисунок 11).



**Рисунок 11** - Микроструктура агломератов, полученных с использованием комбинированного флюса СМ-10:

Спектры: 190-194 – магнетит; 195-198 – стеклофаза ранкинитового состава; 199,200 – твердый раствор ферроокерманита

**Шестая глава** посвящена анализу условий работы цеха АО «Уральская Сталь», результатам опытно-промышленных спеканий, при планировании которых были учтены результаты лабораторных спеканий, и расчету экономической эффективности предлагаемых технических решений.

Анализ условий и результатов работы агломерационного цеха АО «Уральская Сталь» позволил выявить факторы, снижающие его эффективность. Основными «узкими местами» агломерационного производства АО «Уральская Сталь» являются:

- неудовлетворительный фракционный состав известняка и коксика, а также низкая степень обжига извести;
- недостаток внутреннего тепла возврата и тепла от гашения извести для подогрева

шихты в зимний период, приводящий к необходимости снижения высоты спекаемого слоя;

- относительно низкие показатели выхода годного агломерата и его механической прочности, обусловленные недостатком теплового уровня спекания ввиду ограниченного расхода топлива при отсутствии постели;

- низкое содержание железа в агломерате, связанное с необходимостью создания благоприятных условий окомкования за счет вовлечения в процесс бедной по содержанию железа аглоруды и ограниченного использования тонкодисперсных концентратов;

Комплексное решение вышеуказанных «узких мест» возможно только при глубокой модернизации агломерационного цеха. В условиях лимита материальных ресурсов на техническое перевооружение, следует уделять особое внимание решению технологических проблем.

Опытно-промышленные спекания агломератов подтвердили улучшение прочностных показателей спека при использовании в качестве магнезиальной добавки 100% серпентинитомагнезита и комбинированного флюса СМ-10.

Проведенные исследования позволили выявить, что для условий агломерационного цеха АО «Уральская Сталь» наиболее рациональной является технология производства агломерата с использованием в качестве магнезиального компонента шихты смеси бакальского сидерита с серпентинитомагнезитом (СМ-10).

Расчет экономической эффективности предлагаемых решений, разработанных на основе проведенных исследований, доказал, что ожидаемый экономический эффект от внедрения комбинированного флюса СМ-10 (72,2 млн. руб.) выше, чем в случае со 100% серпентинитомагнезита (5,0 млн. руб.). Реализация обоих способов производства агломерата не требует дополнительных капитальных вложений.

## **ВЫВОДЫ**

Результаты и выводы, полученные в ходе проведенного исследования:

1) Показано, что методом термодинамического моделирования можно определить влияние вида флюса на минералогический состав агломерата и дать прогноз о возможных изменениях в качестве готового агломерата. Расчетами с использованием программного комплекса HSC Chemistry 6.1 выявлено, что замена магнийсодержащего флюса в виде сидерита на серпентинит позволяет сократить количество фазы  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , снижающей прочность агломерата. Увеличение основности модельной системы не изменяет тренд на снижение количества двухкальциевого силиката  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  при замене магнийсодержащего флюса сидерит на серпентинит.

2) Экспериментальные спекания агломератов при разнонаправленном изменении содержания в них оксидов кальция и магния позволили установить, что увеличение содержания MgO в виде бакальского сидерита при одновременном снижении содержания CaO/SiO<sub>2</sub> менее 1,5 негативно сказывается на прочностных характеристиках спека, выходе годного, а также удельной производительности по годному агломерату (после сбрасывания). Данные результаты позволяют утверждать, что при использовании в качестве магниальной добавки бакальских сидеритов, необходимо производить агломерат основности по CaO/SiO<sub>2</sub> не ниже 1,5 ед.

3) При проведении экспериментальных спеканий с добавлением бакальского сидерита было установлено, что с ростом содержания MgO в агломерате и постоянной простой основности наблюдается рост прочности спека для всех исследуемых значений CaO/SiO<sub>2</sub> (1,5 и 1,75 ед.). Причем наилучшими прочностными свойствами обладают агломераты с CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,75 ед. (прочность на удар составляет от 69,5 до 76,5%, на истирание - от 6,1 до 5,4%). Минимальные значения характерны для образцов состава MgO = 2%, CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,5 (прочность на удар 64,1%, на истирание – 5,6%).

4) Анализ микроструктуры агломератов состава MgO=2% и CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,5 ед. подтвердил наличие в их структуре двухкальциевого силиката, являющегося основной причиной минимальной прочности агломератов невысоких основностей. Установлено, что MgO практически полностью переходит в рудную фазу, а улучшение прочностных характеристик агломератов происходит за счет увеличения в его микроструктуре доли силикатного расплава при одновременном понижении основности расплава с 1,7 – 1,8 ед. до 1,3 и 1,5 ед., и постепенной смены силикатной связки на ферритную. В совокупности все это способствует сокращению количества образующегося двухкальциевого силиката в структуре агломерата и упрочнению спека.

5) Улучшение прочностных характеристик агломератов химического состава MgO = 2%, CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,75 при использовании бакальского сидерита происходит за счет того, что преобладающей связкой рудных зерен в них становится высокоосновная силикатная стеклофаза (CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,3 и 1,5 ед.), предотвращающая образование β-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. С ростом содержания MgO с 3 до 4% происходит смена силикатной связки на более прочную – ферритную.

б) Замена бакальского сидерита на серпентинитомгнезит в качестве магнийсодержащего флюса позволяет заметно повысить прочностные характеристики готового агломерата. Для агломератов основности CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,5 ед. прочность на удар составляет от 76,0 до 80,7%, на истирание – от 5,3 до 3,9%; для основности 1,75 ед. соответственно: от 77,3 до 82,9% и от 5,4 до 4,7%. В то же время рост прочности

«серпентинитовых» агломератов сопровождается снижением показателей спекания, таких как выход годного агломерата, скорость спекания.

7) Методом электронной микроскопии установлено, что улучшение прочностных характеристик агломератов, содержащих 2 и 3% MgO ( $B_2 = 1,5$ ), полученных с использованием серпентинитомагнезита, обусловлено тем, что вместо образования  $\beta$ - $Ca_2SiO_4$ , большее распространение получают процессы кристаллизации твердых растворов на основе ферроокерманита в матрице силикатного расплава ранкинитового состава. Рост прочности агломератов с высоким содержанием оксида магния (4%) и основностью, обусловлен наличием в их структуре ферритной связки. Причем морфология ферритов в агломератах разной основности, но с высоким содержанием MgO (4%) схожи между собой. Предложен механизм формирования ферритных структур с подобной морфологией.

8) С целью оптимизации технологических параметров спекания и повышения металлургических свойств агломерата предложен комбинированный магнезиальный флюс, представляющий собой смесь бакальского сидерита и серпентинитомагнезита. Опытные спекания с комбинированным магнезиальным флюсом позволили установить, что существенное повышение прочности агломератов происходит с ростом содержания серпентинитомагнезита в флюсе в интервале 5 -15%. А оценка показателей процесса спекания показывает - оптимальное содержание данного компонента в смеси не должно превышать 10%. Использование флюса оптимального состава позволяет увеличить прочностные показатели агломерата на 8% относительно «базового» уровня.

9) При анализе микроструктурных особенностей образцов агломерата, полученного с использованием комбинированного флюса, было отмечено, что наличие серпентинитомагнезита в составе флюса способствует преобразованию гетерогенного силикатного расплава (характерного для «сидеритовых» агломератов) в гомогенный ранкинитового состава, который затем кристаллизуется в виде твердых растворов, ферроокерманита выполняющих роль носителей прочности агломератов основностью  $B_2 = 1,5$  ед.

10) Опытные-промышленные испытания, проведенные в условия АО «Уральская Сталь», подтвердили целесообразность вовлечения серпентинитомагнезита в агломерационное производство с целью упрочнения готового агломерата. Наиболее эффективным является его использование в составе комбинированного флюса, содержащего 10% серпентинитомагнезита (СМ-10).

**Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

1) Овчинникова Е.В. Сравнительный анализ поведения магнийсодержащих материалов Южного Урала при температурах агломерационного процесса / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов, С.А. Писарев, Н.М. Дуров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2016. - Т. 59. - № 11. - С. 814-820.

2) Овчинникова Е.В., Шаповалов А.Н., Горбунов В.Б. Особенности поведения MgO в процессе спекания агломератов с использованием бакальских сидеритов // Черная металлургия, 2016. - № 11 (1403). – с. 30-34.

3) Овчинникова Е.В. Экспериментальные исследования магниезильных агломератов с использованием флюса на основе силиката магния / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов, Н.А. Майстренко, И.С. Берсенев // Сталь, 2018. - № 1. С.2-5.

4) Ovchinnikova E. V. Magnesia Sinter with Flux Based on Magnesium Silicate / E. V. Ovchinnikova V.B. Gorbunov , A.N. Shapovalov , N.A. Maistrenko, and I.S. Bersenev // Steel in Translation, 2018 - Vol. 48. - No. 1. - pp. 34–38.

5) Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. Оценка шлакового режима доменной плавки в условиях АО «Уральская Сталь» // Наука и производство Урала, 2015. - №11. – Т.1 - №1. – с. 35-39.

6) Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. Эффективность применения бакальских сидеритов при производстве магниезильного агломерата в условиях ОАО «Уральская Сталь» // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования, 2015. - Т.1. - № 1. - С. 133-137.

7) Овчинникова Е.В. Применение термического анализа для оценки поведения компонентов аглошихты / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов, М.В. Потапова // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки, 2016. - № 15. – с. 46-52.

8) Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. Новый подход к использованию магниезильных добавок // Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. – с. 465 – 470.