

На правах рукописи



НЕЧКИН Георгий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО  
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ АГЛОМЕРАТОВ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в ОАО «Уральский институт металлов»

Научный руководитель

кандидат технических наук  
Кобелев Владимир Андреевич

Официальные оппоненты:

Загайнов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», заведующий кафедрой «Металлургия железа и сплавов»

Чесноков Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией пирометаллургии черных металлов

Ведущая организация

ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

Защита состоится «3» июля 2015 года в 12<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 004.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Уральского отделения Российской академии наук и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук <http://www.imet-uran.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Дмитриев Андрей Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время качество железорудного сырья оценивается только по стабильности химического состава, выходу мелочи и прочности в исходном состоянии. Эти показатели хотя и достаточно сильно влияют на газодинамику столба шихтовых материалов в печи, однако в полной мере не отражают особенностей физико-химических процессов, определяющих показатели работы доменных печей. Поведение материалов в доменной печи и, следовательно, технико-экономические показатели производства чугуна определяет совокупность металлургических свойств, используемого железорудного сырья.

Металлургические свойства железорудных материалов, определяющие ход доменной печи, производительность и расход кокса, включают наряду с показателями холодной прочности (прочность на удар и выход мелочи) также восстановимость, горячую прочность и высокотемпературные свойства – температуры размягчения-плавления и фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку. И практически все металлургические свойства материалов определяются его минеральной структурой.

Недостаток информации о комплексе металлургических свойств железорудного сырья ограничивает возможности технологов в оперативном управлении, предотвращении аварийных ситуаций и оптимизации технико-экономических затрат как при подготовке сырья к плавке, так и при производстве чугуна.

Учитывая возрастающую конкуренцию на российском и мировом рынке производителей чугуна, любая возможность интенсификации доменной плавки и оптимизации себестоимости по переделам является крайне важной.

Более глубокое исследование и понимание функциональных свойств железорудного сырья в доменной печи позволит отечественным производителям чугуна оставаться конкурентоспособными на глобальных рынках.

**Целью диссертационной работы** является экспериментальное исследование влияния процессов минерального структурообразования на повышение комплекса металлургических свойств железорудных агломератов и их доменной плавки.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Разработать технологию упрочнения агломерата путем замещения силикатной связки связкой на основе феррита кальция;
- Разработать и освоить методологию оценки высокотемпературных свойств железорудного сырья;
- Изучить влияние минеральной формы оксидов магния и марганца на высокотемпературные свойства агломерата и процесс фильтрации промежуточного шлака через коксовую насадку;
- Исследовать поведение продуктов плавки доменной шихты на поверхности раздела фаз «кокс - промежуточный шлак»;
- Провести промышленную апробацию результатов диссертационного исследования в условиях агломерационного и доменного производств.

**Методы исследования.** В основу решения поставленных задач положены существующие стандартные, в т. ч. микрорентгеноспектральный анализ, и разработаны новые методики определения металлургических свойств железорудных материалов в сочетании с оригинальными установками, дающими возможность достоверно моделировать поведение материалов в доменной печи. Обработка результатов проведена с помощью корреляционного и регрессионного анализов в пакете MSExcel.

**Научная новизна работы.**

1) В лабораторных и промышленных условиях получена структура агломерата с игольчатым ферритом кальция. Впервые проведены промышленные испытания по полной замене в агломерационной шихте флюсов синтетическими ферритами кальция и значительно повышена прочность агломерата.

2) Показано различное влияние оксида магния и положительная роль оксида марганца на комплекс высокотемпературных свойств железорудного сырья.

3) Впервые экспериментально установлено распределение элементов в межфазовых процессах, проходящих в коксовой насадке на границе «кокс-шлаковый расплав», определены основные характерные фазы, осаждающиеся на поверхности кокса. Показано влияние карбидных и оксикарбидных фаз на процессы взаимодействия кокса и шлакового расплава.

4) Впервые было рассмотрено взаимодействие коксовой насадки и промежуточных шлаков.

**Основные защищаемые положения.**

Положительное воздействие ферритнокальциевых смесей и синтетических ферритов кальция на металлургические свойства агломерата.

Возможность подавления процессов карбидообразования за счет титанатов кальция, образующихся в результате ферритнокальциевого структурирования агломерата.

Методика оценки фильтруемости продуктов плавки железорудного сырья через коксовую насадку.

Положительное воздействие оксида марганца на процессы агломерации и фильтрации продуктов плавки через коксовую насадку доменной печи.

Механизм распределения элементов в процессах, проходящих в коксовой насадке на границе «кокс-шлак», влияние карбидных и оксикарбидных фаз на процессы взаимодействия кокса и шлакового расплава.

**Практическая значимость работы.** Разработанный методологический комплекс позволяет оценивать металлургические свойства железорудного сырья, достоверно моделировать процессы в нижней части доменной печи. Показаны и промышленно подтверждены возможности улучшения металлургических свойств железорудного сырья, что, в конечном итоге, благоприятно отражается на технико-экономических показателях доменной плавки.

**Личный вклад автора** заключается в формулировании цели и задач исследований, участии в проведении лабораторных и промышленных исследований, обработке результатов экспериментов, их обобщении и анализе.

**Апробация работы.** Результаты исследований и основные положения диссертации отмечены серебряной медалью лауреата международной выставки «Металл Экспо 2009» и дипломом на II научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», Екатеринбург, 2013 г. Результаты исследований и основные положения диссертации также докладывались и обсуждались на всероссийской научной конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», Екатеринбург, 2011г.; V и VI Международных Конгрессах по агло-коксо-доменному производствам «Проблемы доменного и смежных производств в современных экономических условиях работы горно-металлургического и топливно-энергетического комплексов», г. Ялта, Украина, 2012-2013 г.г.; Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов», посвященной 110-летию со дня рождения академика А.М. Самарина; г. Москва, 2012 г.; на международной выставке «Металл Экспо 2013».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано **16** работ, в том числе **7** в журналах рекомендованных ВАК.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертационной работы обеспечиваются проведением большого объема лабораторных исследований на современном оборудовании. Используются контрольно-измерительные приборы, прошедшие соответствующую поверку. Используются метрологически достоверные методики и межметодный контроль. Результаты исследований подтверждены промышленными испытаниями.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, **шести** глав и заключения, изложена на **141** странице машинописного текста, содержит **31** рисунок, **58** таблиц, список литературы из **120** наименований и **2** приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы.

**В первой главе** приведен литературный обзор. Рассмотрены следующие вопросы: минералогические аспекты прочности агломерата, влияние ферритнокальциевых смесей, повышение прочности агломерата, связанное с переходом от силикатной связки к ферритной; оценка влияния оксидов магния и марганца на комплекс металлургических свойств железорудного сырья. Поведение железорудных материалов при плавке в

доменной печи. Опубликованные литературные данные по этим вопросам носят ограниченный, разрозненный и зачастую противоречивый характер. По материалам литературного обзора сформулированы основные задачи исследований.

Исследованию и разработке технологии упрочнения агломерата ферритнокальциевыми флюсами посвящена **вторая глава** диссертации.

Существуют различные концепции прочности агломератов: одни из них строятся на определении фазового состава и деформативных характеристик железорудного сырья, другие – оперируют химико-физическими характеристиками. В качестве основных факторов можно использовать зависимость прочности от количества расплава, модуля основности и количества силикатной связки.

Для одного и того же химического состава и условий его производства прочность агломерата зависит в основном от его окисленности, характеристикой которой может быть модуль микроструктуры Шкодина ( $M_m$ ).

$$M_m = \frac{Fe_{\text{общ}} \cdot CaO}{FeO \cdot SiO_2}$$

Анализ зависимости между модулем микроструктуры и прочностью по ГОСТ 15137-77 показывает, что с увеличением окисленности и основности агломерата прочность возрастает. При одной и той же основности агломерата прочность зависит от окисленности агломерата. Прочность агломерата также зависит от количества расплава ( $K_p$ ), который зависит от расхода твердого топлива на агломерационный процесс и высоты спекаемого слоя.

В общем случае прочность агломерата зависит от модуля микроструктуры и количества расплава ( $K_p$ ) в агломерате:

$$B_{+5} = K_p \cdot M_m + a(\text{const}).$$

В условиях действующего производства не всегда технологически возможно увеличить основность, снизить количество FeO в агломерате, а также изменить высоту слоя и расход твердого топлива. В этом случае увеличение прочности возможно при увеличении количества расплава за счет ввода легкоплавких добавок. Технологически оправданный и эффективный способ – дополнительный ввод в агломерационную шихту легкоплавкого феррита кальция.

Разработаны два варианта применения ферритно-кальциевых материалов при агломерации: ввод в шихту гематито-известняковой (гематито-известковой) смеси и ввод специально приготовленных синтетических ферритов кальция.

*Технологии упрочнения агломерата за счет ввода в шихту гематито-доломито-известняковой смеси.* В этом варианте используется высокая скорость твердофазного минералообразования при взаимодействии известняка (извести) с гематитом в интервале температур 800-1100 °С. В условиях агломерации время пребывания шихты при нагреве совпадает с временем образования ферритов кальция при условии тесного контакта

оксидов кальция и трехвалентного железа. При дальнейшем нагреве шихты до 1200 °С однокальциевый феррит плавится и в образовавшемся расплаве растворяются оксиды кальция, магния, алюминия и железа. Количество расплава возрастает, при этом также растет температура в этой части слоя за счет интенсивного горения твердого топлива.

Состав компонентов шихты в лабораторных опытах и показатели процесса спекания приведены в табл. 1. Количество возврата во всех опытах составляло 25 % от массы шихты. Влажность шихты составляла 8,2 – 8,3 %.

*Таблица 1 – Результаты лабораторных испытаний замены флюсов гематито-доломито-известняковой добавкой*

Показатели	Шихта					
	Базовая	2	3	4	5	6
<u>Состав шихты, кг/т:</u>						
Железорудная смесь	990,4	945,3	923,4	923,9	924,4	925,0
Известняк	83,0	-	-	-	-	-
Доломит	68,0	68,0	-	-	-	-
Известь	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
Смесь известняка с гематитовой рудой	-	45,1+ 83	-	-	-	-
Смесь: известняк+ доломит+ отсева агломерата +отсев окат.	-	-	83+68+5 7+10	82+68+5 7+10	81+68+5 7+10	80+68+ 57+10
Коксовая мелочь	55	55	55	50	46	42
Высота слоя шихты, мм	570	570	590	590	560	560
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	12,95	11,9	12,04	13,41	12,17	12,73
Удельная производительность, т/м <sup>2</sup> ·ч	1,165	1,059	0,994	1,223	1,061	1,107
Прочность, Б <sub>+5</sub> , %	71,8	63,1	76,0	73,1	73,47	73,5
	Б <sub>-0,5</sub> , %	6,0	7,0	6,8	6,6	6,2

Результаты испытаний гематито-доломито-известняковой добавки показывают, что ее применение позволяет повысить прочность агломерата с 71,8 до 73,5-76,0 %. Эффективность этого материала подтверждается тем, что при снижении расхода твердого топлива прочность агломерата сохраняется на высоком уровне.

*Ввод в агломерационную шихту специально приготовленных синтетических ферритов кальция.* В целях упрочнения агломерата целесообразно использовать двухкальциевый феррит ( $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), у которого температура плавления ( $t_{\text{пл}}=1448$  °С ) приближена к температуре плавления оксидов железа, что способствует ассимиляции шлакообразующих оксидов шихты при оптимальном количестве и времени существования расплава. В этом случае наряду с повышением прочности может быть сохранена высокая производительность процесса спекания.

В лабораторных условиях были произведены испытания по замене флюсов синтетическим ферритом кальция. Составы шихт при производстве агломерата с

синтетическим флюсом и показатели процесса спекания приведены в табл. 2. Количество возврата во всех опытах составляло 25 % от массы шихты. Влажность шихты составляла 7,7 – 7,9 %.

Таблица 2 – Результаты лабораторных испытаний замены флюсов синтетическим ферритом кальция

Показатели	Шихта			
	Базовая	С синтетическими ферритами кальция		
<u>Шихта, кг/т:</u>				
Железорудная смесь	990,4	823,1	825,1	825,1
Известняк	83,0	-	-	-
Доломит	68,0	-	-	-
Известь	35,0	25,0	25,0	25,0
Ферритнокальциевый флюс	-	233,0	232,0	232,0
Коксовая мелочь	55,0	45,0	40,0	38,0
Высота слоя шихты, мм	570	520	520	520
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	12,95	11,82	13,35	12,38
Удельная производительность, т/м <sup>2</sup> ·ч	1,165	1,126	1,24	1,156
Прочность по ГОСТ 15137-87, Б <sub>+5</sub> , %	71,8	73,2	77,9	74,4
Б <sub>-0,5</sub> , %	6,0	7,0	5,9	6,1

В результате производства синтетического феррита кальция получен очень прочный спек, превышающий по прочности обычный железорудный агломерат.

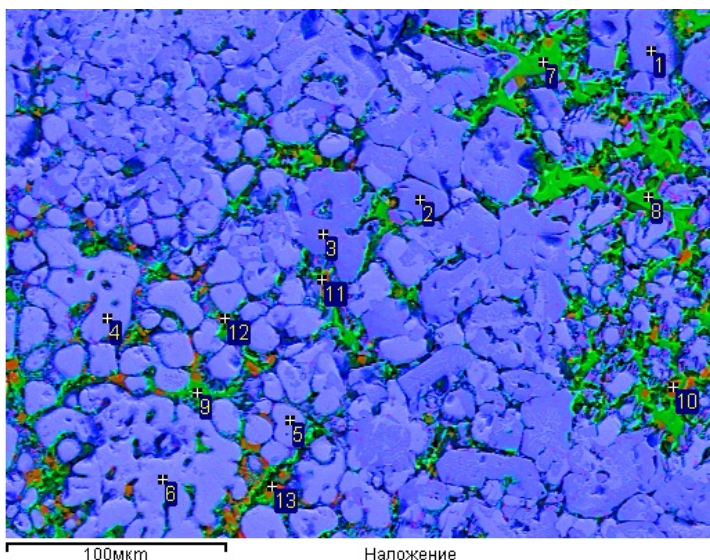
Для оценки влияния синтетического ферритнокальциевого флюса на показатели процесса спекания и качество высокоосновного агломерата, были выполнены лабораторные и промышленные исследования агломерата КГОК, полученного в различных технологических режимах.

Синтетический ферритнокальциевый флюс (аглофлюс) содержит, мас. %: оксиды кальция 60,0-72,0; магния 1,2-2,0; кремния 4,0-6,0; алюминия 1,2-1,9; железа 12,0-25,0; марганца 0,5-3,5, прочие оксиды остальное. Для выяснения влияния синтетического ферритнокальциевого флюса на металлургические свойства агломерата были проведены промышленные испытания аглофлюса на Качканарском ГОКе с последующей проплавкой произведённого агломерата  $CaO:SiO_2 = 2,1$  ед. в смеси с окатышами  $CaO:SiO_2 = 0,4$  ед. в доменных печах НТМК.

С целью выявления различий микроструктуры аглоспёка были проведены работы по снятию паллет с агломашины №2 на КГОК в базовом и опытном периодах.

На рис. 2 приведен фазовый состав базового агломерата из верхней - наименее прочной части слоя агломерата с идентификацией фаз, а в табл. 3 их минералогический состав. Силикатная фаза базового агломерата представлена стеклом и кристаллами двухкальциевого силиката ( $C_2S$ ), кристаллизующимися совместно с титанатом кальция (СТ) – перовскитом. Эти высокотемпературные фазы кристаллизуются из ферритнокальциевого расплава – предположительно из двухкальциевого феррита. Силикатное стекло содержит титан до 27% абс. Диоксид расположен на границе рудных фаз титана (фазы 10,11,12,13 табл. 3).





Стекло является основной частью силикатной связки, располагается на границах рудных зерен и определяет прочность агломерата.

Рис. 2 – Фазовый состав пробы в характеристических рентгеновских лучах (верхняя часть слоя базового агломерата).

Таблица 3– Химический и минералогический состав фаз пробы базового агломерата из верхней части слоя

Фаза	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма	Минеральная форма
1	0,84	0,00	3,40	4,50	9,50	83,44	101,7	Исходный магнетит окисленный
2	0,56	1,50	4,34	3,67	9,50	81,59	101,2	
3	0,70	0,00	4,53	3,83	9,50	83,44	102,0	
4	0,56	0,00	0,76	0,83	9,50	92,73	104,4	Вторичный гематит
5	0,70	0,00	0,76	1,00	9,50	92,30	104,2	
6	0,56	0,00	0,76	0,83	9,50	93,30	104,9	
7	33,60	32,14	10,77	4,17	9,50	9,30	99,5	Стекло CaO*0,92SiO <sub>2</sub> *0,45FeO (0,18Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *0,07TiO <sub>2</sub> )
8	33,18	31,93	11,14	3,83	9,50	9,59	99,2	
9	30,52	32,36	10,77	2,17	9,50	12,44	97,8	
10	42,98	13,07	2,08	26,67	9,50	2,73	97,0	Кристаллические силикаты CaO*0,32SiO <sub>2</sub> *0,44TiO <sub>2</sub> (0,18Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
11	32,76	12,21	3,40	23,17	9,50	13,16	94,2	
12	36,26	14,36	2,46	21,33	9,50	13,73	97,6	
13	42,70	12,00	2,64	25,17	9,50	3,59	95,6	

Фазовый состав агломерата с синтетическими ферритами кальция в характеристических рентгеновских лучах представлен на рисунке 3, а химический состав фаз – в табл. 4.

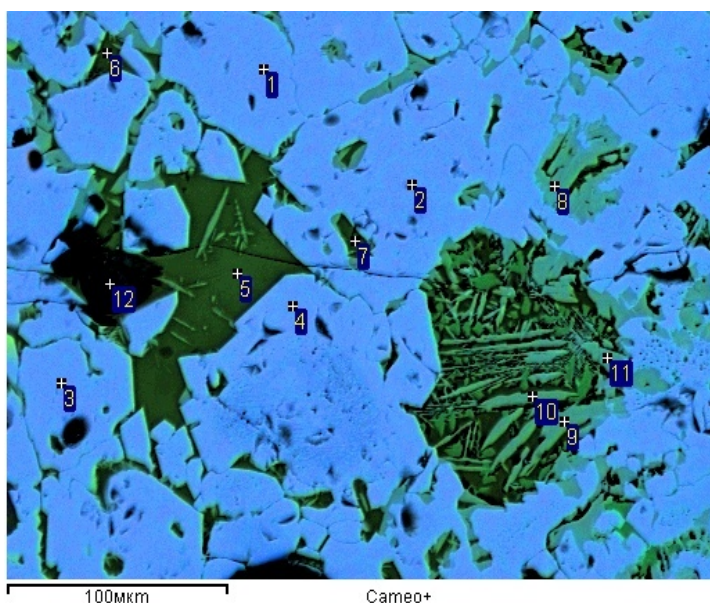


Рис. 3 – Фазовый состав пробы в характеристических рентгеновских лучах (верхняя часть слоя опытного агломерата). Обозначения в табл. 4.

Таблица 4 – Химический и минералогический состав фаз пробы агломерата с ферритнокальциевым флюсом из верхней части слоя

Спектр	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма	Формула
1	1,12	0,00	2,46	0,67	8,00	85,25	97,5	Вторичный гематит с Mn
2	1,40	0,00	2,64	1,00	8,00	84,25	97,3	
3	1,12	0,00	2,64	0,67	8,00	85,11	97,5	
4	1,68	0,00	2,46	0,83	8,00	85,54	98,5	
5	38,64	25,93	4,34	6,50	8,00	15,97	99,4	Кристаллические силикаты CaO*0,63SiO <sub>2</sub> *0,12TiO <sub>2</sub> (*0,05Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *0,18Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
6	41,58	28,71	4,16	8,33	8,00	9,11	99,9	
7	40,60	26,57	3,21	8,17	8,00	8,40	95,0	
8	17,08	5,79	5,10	2,83	8,00	59,97	98,8	Игольчатые ферриты CaO*0,38SiO <sub>2</sub> *1,32Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0,15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *0,11TiO <sub>2</sub> )
9	18,06	7,50	4,91	2,83	8,00	57,11	98,4	
10	18,48	8,79	5,29	3,17	8,00	55,97	99,7	
11	17,64	7,50	4,72	2,83	8,00	58,97	99,7	

В силикатной связке концентрируются оксиды кремния, кальция, титана, алюминия, марганца и ванадия. В железорудных минералах сосредоточено железо, кислород и магний. Железорудные минералы представлены вторичным гематитом, образованным путем кристаллизации из расплава. На этот процесс указывает увеличение концентрации марганца в железорудном минерале. Повышение содержания марганца в железорудном минерале обусловлено наличием марганца в ферритнокальциевом флюсе, имеющем низкую температуру плавления. За счет плавления флюса происходит ассимиляция расплавом исходного магнетита с последующей кристаллизацией гематита.

Силикатная фаза представлена минералами двух видов: кристаллами двухкальциевого силиката (C<sub>2</sub>S), кристаллизующимися совместно с титанатом кальция (СТ) из ферритнокальциевого расплава и игольчатыми кристаллами ферритов кальция (CF). Титан находится в кристаллах двухкальциевого силиката и частично в ферритах кальция. Максимальные концентрации TiO<sub>2</sub> не превышают 8% при этом он связан с CaO (фазы 5,6,7 табл. 4).

Таким образом, силикатная связка в верхней части слоя агломерата с аглофлюсом полностью раскристаллизована, двухкальциевый силикат стабилизирован ферритами кальция и титанатом кальция (табл. 5).

Таблица 5 – Минеральная структура базового агломерата и агломерата с аглофлюсом

Агломераты		Минеральные фазы	
		Минералы железа	Силикатная связка*
Базовый	Верх слоя	1 – исходный окисленный магнетит; 2 – вторичный гематит	1 – стекло; 2 – СТ+ C <sub>2</sub> S
	Середина слоя	1 – исходный окисленный магнетит, частично преобразован	1 – CF+ C <sub>2</sub> S; 2 – стекло; 3 – СТ+ C <sub>2</sub> S
	Низ слоя	1 – исходный окисленный магнетит	1 – CF+ C <sub>2</sub> S; 2 – CF+СТ
С ферритами кальция	Верх слоя	1 – вторичный гематит с Mn	1 – C <sub>2</sub> S+СТ; 2 – CF+ C <sub>2</sub> S
	Середина слоя	1 – вторичный гематит с Mn	1 – CF+ C <sub>2</sub> S; 2 – C <sub>2</sub> S+СТ
	Низ слоя	1 – вторичный гематит с Mn	1 – CF+ C <sub>2</sub> S; 2 – СТ+ CF

Отличие минерального состава агломерата с ферритами кальция от базового заключается в том, что железорудный минерал образуется путем кристаллизации гематита из расплава и обогащен марганцем. Силикатная связка полностью раскристаллизована, двухкальциевый силикат стабилизирован ферритами кальция и титанатом кальция. Этот минеральный состав определяет высокую прочность, минимальный выход мелочи и длительное сохранение прочности при транспортировке и хранении агломерата.

**В третьей главе** рассмотрены результаты промышленных испытаний по эффективному офлюсованию агломерационной шихты ОАО «ЕВРАЗ-КГОК».

Целью ввода эффективных флюсов на фабрике окускования КГОК является повышение удельной производительности агломашин и металлургических свойств агломерата, в том числе холодной и горячей прочности, уменьшение выхода мелочи. При проведении промышленных испытаний основной задачей ставилось повышение эффективности доменного процесса за счет повышения металлургических свойств агломерата.

Переход на ферритно-кальциевую связку и повышение служебных характеристик железорудного агломерата достигается также при повышении основности шихты и применении при его производстве ферритных смесей.

В процессе проведения промышленных испытаний в ОАО «ЕВРАЗ КГОК» фиксировали изменения показателей производства агломерата. В ОАО «ЕВРАЗ НТМК» производили анализ технологических показателей выплавки чугуна на доменной печи №5 с использованием в шихте опытной партии агломерата, произведенного с измененным составом аглошихты.

В опытный период работы железорудная часть аглошихты состояла из концентрата мокрого магнитного обогащения (железованадиевый концентрат) и профилактированного известью концентрата, представляющего собой ферритнокальциевую смесь .

Основным фактором, определившим результаты испытаний, явилась возросшая степень окомкования аглошихты, которая составила 74,4 % против 50,3 % в базовом периоде, т. е. почти в полтора раза.

Во время промышленных испытаний в конце периода была снята паллета и произведена оценка качества агломерата по высоте слоя и ширине паллеты. Результаты исследований представлены в таблице 6. Для сравнения приведены аналогичные показатели в обычном режиме. Анализ этих данных показывает, что ввод извести в аглошихту приводит к существенному улучшению прочности как в верхней, так и в нижней части слоя агломерата.

Механическая прочность произведенного агломерата в опытном периоде повысилась и составила: массовая доля класса более 5 мм – 74,91 % против 73,48 % , содержание мелочи составило 4,60 %, против 4,89 %, истираемость осталась практически на прежнем уровне.

Таблица 6 – Распределение прочности и химического состава в слое агломерата на агломашине № 2 при базовой технологии и в опытном периоде

Слой	Гранулометрический состав, %			Прочность		Химический состав, %					
	40	40-5	-5	Б <sub>+5 мм</sub> , %	Б <sub>-0,5 мм</sub> , %	Fe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub> ед.	C <sub>ост</sub>
<b>Базовый</b>											
Верх	6,42	79,1	14,5	34,3	6,8	54,0	10,1	10,22	4,98	2,054	0,07
Середина	13,1	76,7	10,2	63,6	4,9	54,4	9,7	10,07	4,93	2,044	0,04
Низ	39,7	50,6	9,7	68,8	5,3	54,5	11,1	10,12	4,93	2,052	0,04
Среднее по паллете	19,8	68,8	11,5	55,6	5,7	54,3	10,3	10,14	4,95	2,050	0,05
<b>Опытный</b>											
Верх	6,5	79,8	13,7	47,4	5,4	53,3	9,52	11,31	5,19	2,179	0,06
Середина	13,2	77,6	9,2	68,0	5,3	53,2	9,00	11,16	5,14	2,171	0,03
Низ	12,8	78,0	9,2	73,1	5,8	53,3	8,08	11,11	5,23	2,124	0,03
Среднее по паллете	10,8	78,5	10,7	62,8	5,5	53,3	8,87	11,20	5,19	2,158	0,04

Производительность агломашин в период промышленных испытаний повысилась на 14,9 % и составила 252,2 т/л·ч против 219,5 т/л·ч. Высота слоя шихты возросла и составила 425 мм в среднем (max 450 мм) против 350 мм. При этом удельный расход коксовой мелочи сократился на 8,44 кг/т, или 14,17 %, расход электроэнергии на 4,0 кВт·ч/т, или 8,9 %, расход известняка на 46,0 кг/т, или 27,2 %.

Опытная партия агломерата была проплавлена в доменной печи № 5. При сравнении показателей работы доменной печи установлено, что печь работала в сопоставимых условиях, без простоев и тихих ходов; качество чугуна по содержанию серы при равном содержании кремния не ухудшилось: доля некондиционного чугуна по сере составила 1,4 и 1,1 % в базовом и опытном периодах соответственно при норме 5 %; ход печи был стабильным, ровным, устойчивым; фактическое производство чугуна увеличилось на 31,2 т/сутки, фактический удельный расход кокса снизился на 7 кг/т чугуна.

Анализ промышленного эксперимента показал, что различия в минеральном составе силикатной связки (табл. 5) напрямую сказываются на металлургических свойствах агломерата (табл. 7).

При использовании синтетического феррита кальция в аглошихте прочность агломерата возрастает с 71,8 до 73,2-77,9 %. При оптимальном расходе твердого топлива достигается максимальная прочность и максимальная вертикальная скорость спекания. С учетом уменьшения отсева агломерата в доменном цехе с 14,7 до 9,6 % прогнозное увеличение производительности составит 10,5 %.

Таблица 7 – Техничко-экономические результаты сквозной технологии применения синтетического ферритнокальциевого агломерационного флюса.

№ п/п	Технологические параметры	Способы офлюсования	
		Известняк	Аглофлюс
Агломерационный передел	Степень окомкования шихты, %	36-37	41,7-49,6
	Высота слоя, мм	345	400
	Удельный расход твердого топлива, кг/т	57,9	48,5
	Производительность агломашины, т/л·ч	225,2	250,0
	Прочность по Б <sub>+5 мм</sub> , %	72,0	75,0
	Содержание мелочи фр. 0-5 мм на фабрике, %	5,0	4,5
	Доля отсева мелочи фр. 0-5 мм в ДЦ, %	14,7	9,6
Доменный передел	Среднесуточное производство чугуна ДП№5, т/сут	6200	6700
	Удельный расход скипового кокса, кг/т сут	391,1	376,1
	Минутный расход дутья, нм <sup>3</sup> /мин	4178	4361
	Газодинамическая напряжённость зоны плавления ДП№5, % отн.	100	80,82

В **четвертой** главе диссертации рассмотрены высокотемпературные свойства агломерата и влияние на них оксидов магния и марганца.

Параметры пластичновязкого состояния характеризуют размер и положение зоны когезии, а фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку – газодинамическое сопротивление в горне и выпуск металла и шлака.

Проблема прогнозирования вязкопластичных свойств железорудного сырья остается актуальной и требует дополнительного и тщательного исследования. В связи с этим наиболее полная матрица температурных характеристик железорудных агломератов должна быть дополнена массовой долей монооксида марганца, обычно содержащегося в агломератах.

С учетом дополнения массива химических составов массовой долей оксида марганца можно получить математически корректные однотипные уравнения прогноза температурных характеристик плавления вида:

$$T_{пл} = T_{хар} + \sum_1^{k-1} (a_{Me_m O_n} Me_m O_n) \quad (\text{при } R = R_{max}). \quad (1)$$

где  $k$  – количество оксидов, учтенных в химическом составе железорудных агломератов;  $a_j$  – коэффициенты регрессии;  $R$  – степень восстановления.

Результаты анализа свидетельствуют о линейной зависимости коэффициентов множественной регрессии (коэффициентов вклада)  $a_{Me_m O_n}$  от величины свободного члена  $T_{хар}$

$$a_{Me_m O_n} = a_{Me_m O_n}^0 - 0,01T_{хар}. \quad (2)$$

Разность между температурной характеристикой и абсолютной суммой вкладов оксидов определяется факторами, не связанными напрямую с химическим составом. Так, факторами, определяющими величины  $\sum_1^k (a_{Me_m O_n} Me_m O_n)$ , могут быть степень

неравновесности процесса спекания со всеми вытекающими из этого обстоятельства следствиями, а также нарушения микроструктуры, к которым относятся минеральный состав, тонкое поровое пространство и разного рода дислокации. Также следует подчеркнуть, что каждому химическому составу агломерата соответствует вполне определенный вклад оксидов в его температурные характеристики, то есть доля влияния фактора является величиной не постоянной (уравнение (3)).

$$\delta T = (a_{\text{Me}_m\text{O}_n}^{\circ} - \text{const} \cdot T_i) \text{Me}_m \text{O}_n. \quad (3)$$

Температура начала плавления:

$$a_{\text{MgO}} = 20,09 - 0,01T_{\text{н}}; \delta T_{\text{н}} = 7,652 a_{\text{MgO}}, (0,988);$$

$$a_{\text{MnO}} = 8,25 - 0,01T_{\text{н}}; \delta T_{\text{н}} = -3,830 a_{\text{MnO}}, (0,908);$$

Температура конца плавления:

$$a_{\text{MgO}} = 14,36 - 0,01T_{\text{к}}; \delta T_{\text{к}} = 0,080 a_{\text{MgO}}, (-0,139);$$

$$a_{\text{MnO}} = -11,82 - 0,01T_{\text{к}}; \delta T_{\text{к}} = -25,870 a_{\text{MnO}}, (0,999).$$

Таким образом, установлено, что в границах реального химического состава агломератов компонентами, всегда

- уменьшающими величину  $T_{\text{н}}$ , является MnO, увеличивающими величину  $T_{\text{н}}$ , – MgO;
- уменьшающими величину  $T_{\text{к}}$ , является MnO, при этом MgO при температурах  $T_{\text{к}} < 1410$  °C увеличивает ее, а при  $T_{\text{к}} > 1410$  °C – уменьшает.

Рассматривая задачу о роли оксидов в формировании температурных характеристик, то ее решение при повышении коэффициентов детерминации приводит в ряде случаев к существенно иным количественным результатам. Для температуры  $T_{\text{н}}$  это касается оксидов трехвалентного железа и двухвалентного марганца, а для температуры  $T_{\text{к}}$  – основных оксидов: кальция и магния. Таким образом, окончательный вывод о вкладе оксидов в температурные характеристики плавления может быть сделан только на основе сопоставления прогнозных значений вкладов и экспериментальных данных.

Определение температурного интервала «размягчения-плавления» производили на основе ГОСТ 26517–85 “Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения температуры начала размягчения и температурного интервала размягчения”. Температурный интервал размягчения и плавления (ТИРП) определяли как разность между температурой конца плавления и температурой размягчения.

Чем выше температура размягчения и чем меньше ТИРП испытанного железорудного материала, тем в большей мере он может удовлетворять условиям доменной плавки.

Для определения влияния химического и минералогического состава на высокотемпературные свойства железорудных материалов были произведены в лабораторных условиях из шихт ОАО «ММК», ОАО «ЧМК» и ОАО «НЛМК» опытные агломераты с различными добавками. Согласно ГОСТ 26517–85 были определены вязкопластичные свойства лабораторных агломератов (табл. 9).

*Таблица 9 – Вязкопластичные свойства ЖРМ по ГОСТ 26517–85*

Агломерат	Температура, соответствующая усадке слоя, °С		ТИРП	Химический состав агломератов, %		
	T <sub>p</sub>	T <sub>пл</sub>		MgO	MnO	CaO/SiO <sub>2</sub>
Агломераты ММК						
М1	1180	1395	215	1,71	0,29	1,62
М2	960	1370	390	2,39	0,27	1,60
М3	1230	1390	160	1,70	0,60	1,64
М4	1055	1385	330	2,84	0,48	1,36
М5	1150	1345	195	2,84	0,79	1,36
Агломераты ЧМК						
Ч1	1130	1440	310	1,13	0,69	1,27
Ч2	1170	1420	250	1,28	0,65	1,20
Ч3	1100	1425	325	1,43	0,65	1,11
Ч4	1100	1370	270	1,48	1,55	1,08
Агломераты НЛМК						
Н1	995	1400	405	1,91	0,04	1,70
Н2	1050	1440	390	1,89	0,61	1,70
Н3	1085	1390	305	1,88	0,88	1,70

Анализ табл.9 показывает что, введение в базовую шихту (агломерат М1) магнезии сопровождается расширением ТИРП (М2), Дополнительный ввод в базовую аглошихту ММК (М1 и М3) марганцевой руды позволяет повысить температуры размягчения и тем самым существенно сузить ТИРП (М2 и М4).

На примере аглошихты ЧМК можно проследить влияние минеральной формы вводимого марганца, так при вводе марганцевой руды (Ч1 и Ч3) ТИРП шире, чем при вводе в аглошихту аглофлюса (Ч2 и Ч4). Такое влияние различных форм марганца на ТИРП связано, прежде всего, с тем, что марганец в виде соединения с оксидом кальция более эффективно входит в структуру тугоплавких оксидов, заметно снижая температуры их плавления и, как следствие, уменьшает ширину зоны когезии. Измерение ТИРП агломератов НЛМК лишь подтвердило предыдущие выводы: ТИРП закономерно сужался от базового агломерат (Н1) к агломерату с вводом марганцевой руды (Н2), но наиболее эффективно – введение марганца в форме ферритнокальциевого флюса, содержащих марганец в соединении с оксидом кальция (агломерат Н3). Таким образом, подбором компонентов доменной и агломерационной шихт можно управлять величиной зоны когезии и ее расположением в доменной печи.

Следует отметить различия в смачиваемости шлаком кокса в зависимости от содержания оксидов магния и марганца в агломерате. Так, повышение содержания оксида магния и снижение оксида марганца в агломерате приводит к тому, что шлак смачивает углерод и способен проникать в поры кокса, задерживаясь на его поверхности. Первичный шлак от плавления базовых агломератов гетерофазный, малоподвижный. Первичные шлаки от плавления агломератов с марганцевыми добавками полностью расплавленные, гомогенные, образуют характерный выпуклый мениск в графитовом тигле на поверхности чугуна, а максимальная интенсивность доменной плавки достигается при формировании противоточной насадки из кокса, не смачиваемого расплавом.

Одним из путей интенсификации доменной плавки является повышение газопроницаемости нижней части столба шихтовых материалов. Это может быть достигнуто путем улучшения физико-химических свойств жидкой фазы, т.е. увеличением подвижности и физико-химических свойств шлака сразу после его расплавления за счет изменения химического состава железорудной шихты. Как правило, с фильтруемостью промежуточного шлака через коксовую насадку и связаны основные трудности ведения доменной плавки. Фильтруемость – отношение массы продуктов плавки (металла и шлака), прошедших через коксовую насадку, к общей массе продуктов плавки (исходных металла и шлака). Впервые систематический подход к анализу фильтруемости был применен С.В. Шавриным и И.Н. Захаровым. Для изучения фильтруемости была существенно переработана и освоена методика, позволяющая достоверно оценивать высокотемпературные свойства железорудного сырья.

Исследование фильтруемости промежуточных шлаков через коксовую насадку показало, что состав агломерационной шихты существенно влияет на фильтруемость продуктов плавки и, особенно, шлака через коксовую насадку.

*Влияние магнезиальных добавок на фильтруемость агломератов ОАО «ММК».* Во всех опытах использовали лабораторные агломераты, полученные из шихт на основе аглошихты ОАО «ММК» с различным содержанием MgO, а в качестве коксовой насадки – промышленный кокс ММК фракции 10-15 мм. Показатели лабораторного процесса фильтрации через кокс продуктов плавания агломератов ММК приведены в табл. 10.

Таблица 10 – Результаты фильтрации агломератов ММК

Вид сырья	Степень фильтруемости продуктов плавки, %	Степень фильтруемости шлака, %	Содержание оксидов, %		Основность CaO/SiO <sub>2</sub> , ед.
			MgO	MnO	
Агломерат М1	90,9	57,1	1,71	0,29	1,80
Агломерат М3	94,6	69,5	1,70	0,60	1,80
Агломерат М4	94,1	17,5	2,84	0,48	1,36
Агломерат М5	95,7	25,4	2,84	0,79	1,36
Агломерат М6	91,1	67,7	3,01	0,99	2,20
Агломерат М7	93,7	74,7	2,62	1,03	2,20

Показано, что благоприятное влияние оксида магния на фильтруемость шлака имеет экстремальный характер. Значительную роль на фильтруемость продуктов плавки с повышенной магнезией играет основность агломерата. При основности в диапазоне 1,0 - 1,4 ед. продукты плавки образуют вспененную массу, запирающую коксовую насадку, вследствие чего такие шихты имеют неудовлетворительную фильтруемость (М3) или не фильтруются вообще. При вводе марганца в состав и повышении основности агломерата (М5) с 1,8 до 2,2 ед. некоторое увеличение содержания MgO не приводит к заметному ухудшению вязко-пластичных свойств и фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку.



Положительное влияние оказывает ввод в аглошихту марганцевой руды для агломератов (М2) на основе базового состава железорудной части (М1) и при увеличении в шихте доли MgO (М5). Так, ввод марганцевой руды в базовую аглошихту увеличил степень фильтрации продуктов плавки на 4,1 отн. %, шлака на 21,7 отн. %. Подобное влияние можно проследить и на шихтах с повышенным содержанием MgO: в среднем степень фильтруемости продуктов плавки увеличилась на 2,1 отн. %, шлака на 25,1 отн. %.

*Влияние минералогического состава магнезиальных добавок на фильтруемость агломератов ОАО «ВГОК».* Для рассмотрения влияния минералогической составляющей магнезиальных добавок на фильтруемость продуктов плавки на базе аглошихты ОАО «ВГОК», были получены в лабораторных условиях 4 агломерата, полученные путем ввода в шихту различных магнийсодержащих материалов. Влияние минералогической формы MgO на фильтруемость шлакового расплава было исследовано путем фильтрации через кокс продуктов плавления этих агломератов (рис. 5).

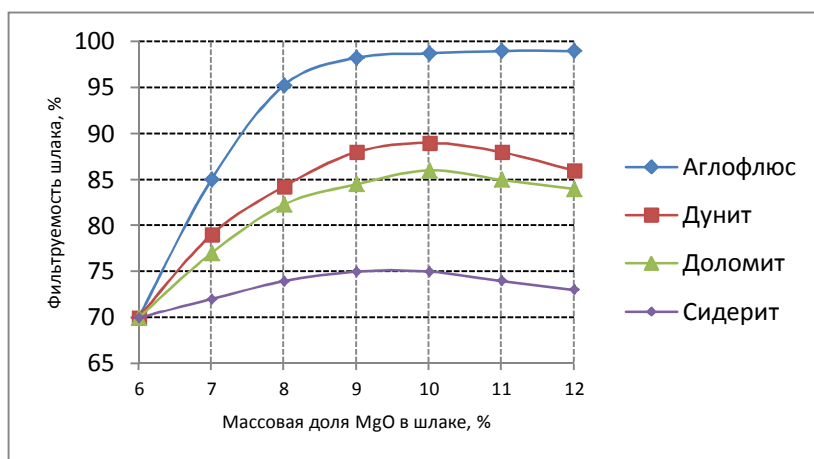


Рис. 5 – Влияние минерального состава вводимых магнезиальных добавок на фильтруемость шлака агломерата ВГОК с модулем основности  $CaO:SiO_2 = 1,25$  ед.,  $Al_2O_3=2,8$  % на коксе НТМК

Анализ зависимостей показывает разный характер

влияния на фильтруемость продуктов плавки и особенно шлака различных типов магнезиальных добавок, обусловленный различными минеральными формами, напрямую влияющими на поведение оксидов при формировании минеральной структуры агломерата. Таким образом, для агломерата ВГОК замена магнезиальной добавки – сидерита на другие виды магнийсодержащих материалов способствует существенному улучшению фильтруемости шлака через коксовую насадку.

*Влияние марганцевых добавок на фильтруемость агломератов.* В целях определения характера воздействия марганца на процессы фильтрации продуктов плавки агломератов через коксовую насадку была проведена серия экспериментов по той же методике, но с использованием агломератов ОАО «ЧМК. Введение в аглошихту ЧМК манганокальцитового флюса способствует улучшению фильтруемости шлаковой части продуктов плавки через коксовую насадку в среднем на 65,9 отн.%, а использование ферритнокальциевого флюса взамен сырого известняка и обожженной извести приводит к такому же результату, что и ввод манганокальцитового флюса, и при этом дополнительно снижается продолжительность фильтрации продуктов плавки через коксовую насадку.

Исследования показали, что введение в агломерационную шихту НЛМК добавок марганецсодержащих материалов с повышением содержания оксида марганца до 0,5 - 0,6 % также положительно влияет на процесс фильтрации продуктов плавки через коксовую насадку.

Для уточнения влияния минерального состава вводимых марганцевых добавок на фильтруемость шлака агломерата ЧМК для различных видов марганецсодержащих материалов была исследована зависимость фильтруемости марганцовистых шлаков от содержания MnO. Результаты приведены на рис. 6.

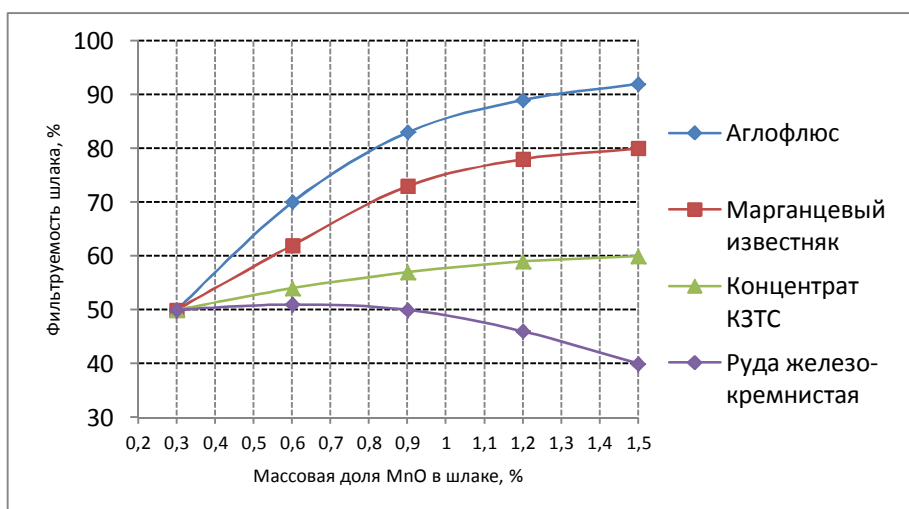


Рис. 6 – Влияние минерального состава вводимых марганцевых добавок на фильтруемость шлака агломерата ЧМК с модулем основности  $\text{CaO}:\text{SiO}_2 = 1,4$  ед.,  $\text{Al}_2\text{O}_3=2,3\%$  на коксе «Мечел-кокс».

Анализ рис. 6 подтверждает эффективность ввода несвязанного в силикаты марганца. За счет повышенной жидкотекучести и блокирования карбидообразования промежуточный шлак из агломератов, полученных с использованием ферритнокальциевого флюса, фильтруется практически в полтора – два раза лучше, чем аналогичный по химическому составу агломерат с добавкой железо-кремнистой марганцевой руды.

Таким образом, эффективным средством улучшения высокотемпературных свойств и фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку является дополнительный ввод в агломерационную шихту марганца в необходимой минеральной форме с соблюдением оптимального содержания магния.

**Пятая глава** посвящена исследованию межфазных процессов проходящих на границе раздела «кокс-шлаковый расплав». Для понимания природы процессов и механизмов межфазовых взаимодействий, определяющих процессы фильтрации продуктов плавки через коксовую насадку, а также для оценки влияния на них магния и марганца был проведен микрорентгеноструктурный анализ (МРА) поверхности раздела фаз кокс-шлак после плавления и фильтрации железорудных шихт.

На рис. 7 приведено изображение границы раздела «кокс-шлак» в условиях ОАО «НТМК» в режиме наложения цветов и обозначены характерные фазы. Химический анализ обозначенных фаз показал, что фазы 1, 2 представляют собой железо с включениями карбидов марганца и кремния. Поведение марганца на границе раздела фаз кокс-шлак зависит от минералогической формы вводимого марганца. Марганец в форме

изначально связанной с железом восстанавливается позже железа и уже на коксе, как карбидообразователь, образует карбиды в матрице железа. Марганец, внесенный в виде флюса и связанный с оксидом кальция, находится в форме, не связанной изначально с железом и, достигая коксовой насадки в окисленной форме, разжижает шлак и снижает температуру плавления и благоприятно влияет на фильтруемость шлаков.

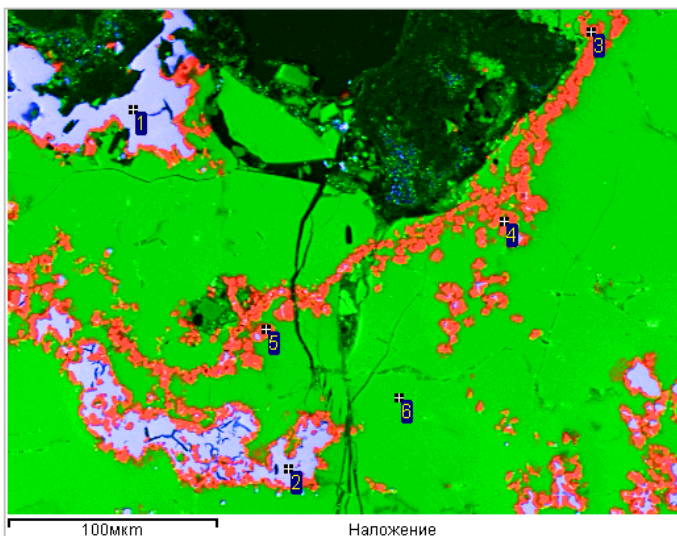


Рис. 7 – Идентификация фаз на поверхности раздела фаз кокс-шлак.

Фазы 3, 4, 5 представлены сложными оксикарбидами либо карбидами титана, содержащими небольшое количество ванадия. Наличие ванадия в этой фазе, связано с изоморфным замещением ванадием титана в решетке карбидов.

Фаза 6 представляет собой шлак на основе оксидов кальция, кремния, алюминия и магния.

На рис. 8 приведено растровое изображение поверхности аншлифа кокса ОАО «ММК» в характеристических рентгеновских лучах. Из результатов анализа следует, что распределение кремния, алюминия и кальция практически идентично, титан концентрируется на границе раздела фаз, марганец распределен равномерно по образцу, кислород также распределяется равномерно, исключая области, в которых есть титан, что свидетельствует о преобладании карбидных фаз над оксикарбидными. Фазы 1 и 3 практически идентичны и представляют собой шлак на основе оксидов кальция, кремния, алюминия и магния. Фазы 4, 5, 6 – непрерывный ряд карбидов и оксикарбидов титана.

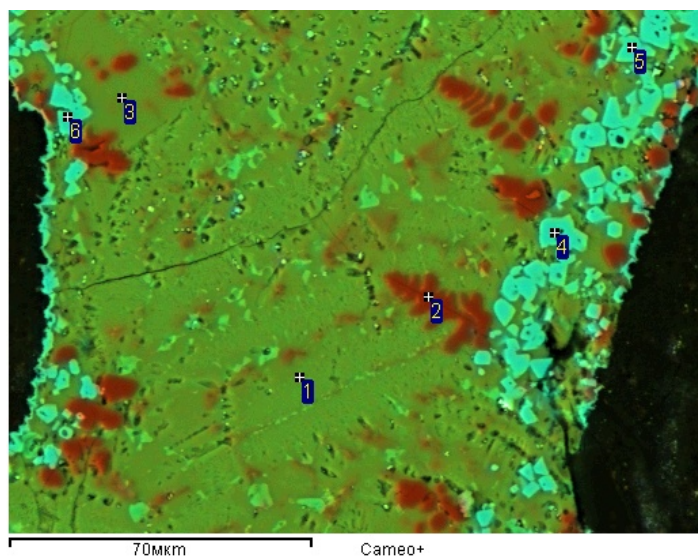


Рис. 8 – Идентификация фаз на поверхности раздела фаз кокс-шлак.

Особо нужно отметить фазу 2, состоящую из практически чистого оксида магния, что было не характерно для рассмотренных выше коксов ОАО «НТМК», в которых магний, присутствуя в составе шлаковой фазы, был равномерно распределен по поверхности образца и не образовывал собственной фазы.

Причины этого явления лежат в минералогических особенностях ЖРС различных комбинатов. Если магний в ЖРС ОАО «НТМК» (ОАО «КГОК»), находясь в форме оливинов (силикатов магния), более или менее равномерно распределен по объему агломерата и окатышей, то в составе аглошихты

ОАО «ММК» дополнительно вводится сидерит, в котором  $Mg^{2+}$  изоморфно замещает железо и затруднено образование оливина. Разная минералогическая форма вводимого магния определяет различия в механизме кристаллизации его оксида на коксе, так магний в форме оливинов (силикатов магния) кристаллизуется в виде силикатов, а ввод сидерита в шихту приводит к образованию отдельной тугоплавкой фазы  $MgO$ .

Особенности химического и минералогического состава оказывают определенное влияние на поведение отдельных оксидов и характер образования оксикарбидных фаз на поверхности кокса. Так, введение в агломерат ферритнокальциевого флюса влечет за собой образование на коксе тугоплавких титанатов кальция ( $CaTiO_3$ ), из которых титан не восстанавливается и не образует карбиды, что в свою очередь положительно влияет на фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку.

**В шестой главе** приведены результаты промышленной апробации агломерата с улучшенными металлургическими свойствами в условиях доменной плавки.

В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что повышение эффективности работы доменных печей ОАО «НЛМК» и снижение газодинамического напряжения в нижней части доменной печи возможно за счет улучшения металлургических свойств агломерата. Наиболее простым и легко реализуемым способом улучшения металлургических свойств агломерата является ввод в шихту марганецсодержащего материала и увеличение содержания оксида марганца в агломерате до 0,4-0,8 %.

В связи с этим была подготовлена программа по проведению промышленных испытаний с вводом в аглошихту марганцовистого известняка, содержащего тонкодисперсное проращение оксидов кальция и марганца, наличие соединения – манганата кальция, а также небольшое количество оксидов кремния и алюминия

Промышленной апробации агломерата с улучшенными металлургическими свойствами подтвердила, что улучшение вязкопластичных свойств ЖРС с вводом марганца позволяет увеличить фильтруемость расплава и тем самым уменьшить газодинамическую напряженность на  $1,7 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$  в сравнении с базовым периодом, при этом в проверочном периоде величина газодинамической напряженности возвращается практически на исходный уровень. Снижение газодинамической напряженности благоприятно сказалось на производительности и расходе кокса. В опытном периоде приведенная суточная производительность увеличилась по сравнению с базовым периодом на 132,4 т, а по сравнению с проверочным на 155,4 т. Удельный расход кокса в опытном периоде снизился на 13,3 кг/т чугуна, а в проверочном - на 7,6 кг/т.

### **Выводы по работе**

- 1) Показано, что одним из способов повышения эффективности доменной плавки является повышение металлургических свойств агломерата.
- 2) Выявлено, что использование в качестве агломерационного флюса ферритнокальциевых смесей и специально подготовленного синтетического

ферритнокальциевого флюса за счет перестройки минерального каркаса, стабилизации двухкальциевого силиката ферритами и титанатом кальция и преобразования силикатной связки значительно улучшает механические свойства агломерата.

- 3) Установлено, что эффективным средством улучшения высокотемпературных свойств и фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку является ввод в агломерационную шихту оптимального количества магния и марганца в необходимой минеральной форме.
- 4) Показано, что ввод в агломерационную шихту марганца в соединении с оксидом кальция эффективно снижает температуру плавления тугоплавких оксидов, уменьшая ширину зоны когезии, подавляет карбидообразование и увеличивает степень фильтрации промежуточного шлака.
- 5) Анализ поверхности раздела кокс-промежуточный шлак после фильтрации продуктов плавки показал, что для эффективной работы коксовой насадки доменной печи на этапе подготовки железорудного сырья необходимо связывать в устойчивые минеральные формы оксиды кремния и магния.
- 6) Поведение марганца на границе раздела фаз кокс-промежуточный шлак зависит от минералогической формы вводимого марганца.
- 7) Результаты исследования полностью подтверждены промышленной апробацией в агломерационном и доменном производстве.

### **Основные публикации по теме диссертации**

*В научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Чернавин, А. Ю. Моделирование поведения шихтовых материалов в доменной печи [Текст] / А. Ю. Чернавин, Г. А. Нечкин, Д. А. Чернавин, В. А. Кобелев // Сталь. – 2010. – № 4. – С. 24.
2. Чернавин, А. Ю. Моделирование поведения шихтовых материалов в нижней части доменной печи [Текст] / А. Ю. Чернавин, Г. А. Нечкин, Д. А. Чернавин, В. А. Кобелев, С. В. Филатов // Сталь. – 2010. – № 5. – С.20-24.
3. Пузанов, В. П. Основы работы противоточной коксовой насадки доменной печи (сообщение 2) [Текст] / В. П. Пузанов, Г. А. Нечкин, Г. А. Птичников, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин // Сталь. – 2012. – № 11. – С. 2-8.
4. Пузанов, В. П. О плотности орошения продуктами плавки коксовой насадки доменной печи [Текст] / В. П. Пузанов, Г. А. Нечкин, О. П. Онорин, В. А. Кобелев // Сталь. – 2012. – № 4. – С. 6-15.

*В других изданиях:*

5. Пузанов, В. П. Об интенсивности орошения коксовой насадки и фильтруемости продуктов плавки в доменной печи [Текст] / В. П. Пузанов, Г. А. Нечкин, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин // Черная металлургия. – 2011. – № 8 (1340). – С. 45-55.
6. Нечкин, Г. А. Фильтруемость доменных шлаков через коксовую насадку горна доменных печей [Текст] / Г. А. Нечкин, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин, Д. А. Чернавин // Черная металлургия. – 2012. – № 9 (1353). – С. 15-19.
7. Нечкин, Г. А. Формирование доменной шихты с целью улучшения фильтруемости расплава через коксовую насадку горна [Текст] / Г. А. Нечкин, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин // Черная металлургия. – 2014. – № 9. – С. 23-26.

8. Нечкин, Г. А. Лабораторные исследования свойств коксовой насадки во взаимодействии с расплавом железорудного сырья ОАО «НТМК» [Текст] / Г. А. Нечкин, Д. А. Чернавин, А. Ю. Чернавин и др. // Межрегиональный сб. науч. трудов: Теория и технология металлургического производства. – Магнитогорск, 2010. – С.12-17.

9. Чернавин, А. Ю. Разработка специальных промывочных материалов и технологии промывки доменных печей [Текст] / А. Ю. Чернавин, Г. А. Нечкин, Д. А. Чернавин, В. А. Кобелев // Сборник конф.: «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», Екатеринбург, 16-17 июня, 2011. – Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН, 2011. – С.178-182.

10. Нечкин, Г. А. Повышение прочности обожжённых окатышей путем ввода специальной упрочняющей добавки в шихту [Текст] / Г. А. Нечкин, Д. А. Чернавин, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин // Межрегиональный сб. науч. трудов: Теория и технология металлургического производства. – Магнитогорск, 2011. – С.16-21.

11. Нечкин, Г. А. Повышение прочности обожжённых окатышей путем ввода специальной упрочняющей добавки в шихту [Текст] / Г. А. Нечкин, Д. А. Чернавин, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин // Сборник трудов конференции: Неделя Металлов в Москве. – Москва: ВНИИМЕТМАШ, 2012. – С.168-172.

12. Нечкин, Г. А. Исследование межфазных процессов, проходящих на границе раздела «кокс-шлак» [Текст] / Г. А. Нечкин, В. А. Кобелев // Сборник материалов междунар. науч. конф.: «Физико-химические основы металлургических процессов», Москва, 28-29 ноября, 2012. – М.: ИМЕТ РАН, 2012. – С. 91.

13. Нечкин, Г. А. Фильтруемость доменных шлаков через коксовую насадку горна доменных печей [Текст] / Г. А. Нечкин, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин, Д. А. Чернавин // Сб. науч. трудов V междунар. конгресса по агло-кокс-доменному производствам «Проблемы доменного и смежных производств в современных экономических условиях работы горно-металлургического и топливно-энергетического комплексов», Ялта, Украина, 21-25 мая, 2012. – ОПЧ, 2012. – С. 362-370.

14. Нечкин, Г. А. Формирование доменной шихты с целью улучшения фильтруемости расплава через коксовую насадку горна [Текст] / Г. А. Нечкин, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин // Сб. науч. трудов VI междунар. конгресса по агло-кокс-доменному производствам «Проблемы доменного и смежных производств в современных условиях. Технологии использования разных видов топлива и сырья», Ялта, Украина. 20-24 мая, 2013. – ОПЧ, 2013. – С. 439-446.

15. Кобелев, В. А. Промышленные испытания способов эффективного офлюсования агломерационной шихты в ОАО «ЕВРАЗ КГОК» [Текст] / В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин, Г. А. Нечкин, А. Г. Сухарев, Д. Н. Волков, В. Ю. Чикишев // Сборник трудов науч.-практ. конф. с международным участием и элементами школы для молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – С.92-96.

16. Нечкин, Г. А. Формирование доменной шихты с целью улучшения фильтруемости расплава через коксовую насадку горна [Текст] / Г. А. Нечкин, В. А. Кобелев, А. Ю. Чернавин // Сборник трудов науч.-практ. конф. с международным участием и элементами школы для молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – С.139-144.