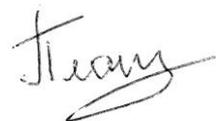


Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»

На правах рукописи



ПЛОТНИКОВ Станислав Валериевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ  
ОКИСЛИТЕЛЬНОМ ОБЖИГЕ И МЕТАЛЛИЗАЦИИ ОКАТЫШЕЙ ИЗ РУД  
ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ

Специальность 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА, 2013 г.

Диссертационная работа выполнена на кафедре экстракции и рециклинга черных металлов Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

**Научный руководитель**

профессор каф. ЭиРЧМ НИТУ «МИСиС»,  
кандидат геолого-минералогических наук

**Малышева Т.Я.**

**Официальные оппоненты:**

профессор НИТУ «МИСиС», член корреспондент АЕН РФ

доктор технических наук

**Рыжонков Д.И.**

менеджер по исследованию сырья компании ОАО «Северсталь»

кандидат технических наук

**Деткова Т.В.**

**Ведущая организация:**

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г.Москва

Защита состоится **27 июня 2013 года** в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.6, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автореферат диссертации размещен на официальном сайте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» – <http://misis.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый Совет. Копии отзывов можно прислать на e-mail: [northfox@list.ru](mailto:northfox@list.ru).

Автореферат разослан «27» мая 2013 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.132.02,  
кандидат технических наук, доцент



**Колтыгин А.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Процесс производства железорудных окатышей из тонких, богатых по железу концентратов освоен практически на большинстве горно-обогатительных комбинатах. В настоящее время налажено производство полностью окисленных окатышей различной основности. Однако сохранились предприятия, производящие зональные окатыши в результате либо недоработок технологического режима обжига, либо стремления к снижению себестоимости продукции и увеличению производительности обжиговых машин в ущерб качеству производимых окатышей.

В работе на примере щелочесодержащих<sup>1</sup> руд железистых кварцитов КМА решались две основные задачи: поиск причины образования в промышленных условиях зональных окатышей невысоких прочностных свойств и определение значения роли щелочей в процессах окислительного обжига окатышей, последующего настылеобразования и металлизации в шахтной печи.

Проблема зональных окатышей и использование их в металлургическом переделе недостаточно освещена в литературе, поэтому изучение причин и механизма их образования и использования в металлургических процессах актуально до сих пор.

В настоящей работе большое внимание уделено изучению реального фазового состава продуктов металлургического передела – окатышей и металлизированных брикетов, что позволило восстановить последовательность процессов минералообразования при промышленном производстве окатышей и исследовать особенности их поведения при металлизации в шахтной печи

В работе изучены:

- минералогический состав железорудного концентрата, содержащего в своем составе кремний-щелочные силикаты;
- минеральный состав, особенности микроструктуры и прочностные свойства зональных окатышей, полученных при термообработке на обжиговой машине;
- поведение зональных окатышей в процессе восстановления их в шахтной печи;
- механизм настылеобразования в шахтной печи при использовании зональных окатышей;
- фазовый состав и структурные особенности металлизированных брикетов.

Результаты работы позволяют разработать рекомендации по получению полностью окисленных гематитовых окатышей с целью производства железорудного сырья высоких металлургических свойств.

---

<sup>1</sup> В настоящей работе под щелочами принято понимать оксиды  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$

**Цель работы.** Диссертационная работа посвящена исследованию промышленного цикла металлургического производства от магнетитовых концентратов руд железистых кварцитов до получения металлизованных брикетов с учетом шихтовых и технологических условий существующих на горно-обогатительном комбинате КМА: влиянию на механизм упрочнения и качество окатышей щелочесодержащих силикатов руды железистых кварцитов и изучению поведения окатышей при их восстановлении в шахтной печи. Одной из главных целей диссертации является выявление причин невысокой прочности промышленных окатышей и поиск путей оптимизации их свойств для процессов прямого получения железа.

**Научная новизна.** При проведении работы широко использованы методы фазового анализа продуктов металлургического производства, в результате получены следующие результаты:

1. Впервые на примере использования руд железистых кварцитов (КМА) установлено влияние генетического типа железной руды на процессы производства окисленных окатышей и получение из них металлизованных брикетов;

2. Впервые установлено определяющее влияние высококремнистых щелочных минералов руды на состав и свойства промышленных окатышей. При термообработке природные кремний-щелочные минералы целиком переходят в состав силикатной фазы окатышей, образуя стеклофазу сложного состава. По данным рентгеноспектрального микрозондирования в ее составе обнаружены оксиды кремния, кальция, алюминия, магния, железа и щелочи, при этом установлено, что температура размягчения стеклофазы окатышей значительно ниже температур плавления природных щелочесодержащих силикатов руды;

3. Предложен механизм настылеобразования при использовании в шахтной печи окатышей с кремний-щелочной стеклофазой. В верхних горизонтах шахтной печи практически одновременно с восстановлением гематита и размягчением стеклофазы происходит образование вязкопластической массы, которая и становится основным «строителем» настылей;

**Фактический материал.** Объектом диссертационного исследования являлись полученные в промышленных условиях офлюсованные окатыши ( $\text{CaO/SiO}_2$  0,2 – 0,4), поступающие в цех горячего брикетирования железа, где проходят процесс восстановления с получением металлизованных брикетов. Предметом исследования служили образцы офлюсованных окатышей, полученные на обжиговой машине ОК-306, образцы металлизованных брикетов, полученных на установке ХиЛ-III и настыли, отобранные при остановке печи на капитальный ремонт.

Работа выполнена на кафедре экстракции и рециклинга черных металлов Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»).

**Практическая значимость.** По результатам работы установлено, что в промышленных условиях ряда горно-обогатительных комбинатов КМА при использовании руд железных кварцитов производит зональные окатыши, содержащие в своем составе низкотемпературные кремний-щелочные стеклофазы, определяющие процессы настылеобразования в шахтной печи и остающиеся без изменений в составе металлизированных брикетов.

Главной причиной образования в составе окатышей зональности при существующем технологическом режиме обжига является недоокисление магнетита в центральных участках гранулированной шихты на стадии твердофазного спекания и низкотемпературное расплавообразование, блокирующее магнетитовые ядра в высокотемпературных зонах обжига.

Наличие низкотемпературных кремний-щелочных стеклофаз в связке окатышей является результатом участия в процессе расплавообразования природных щелочесодержащих силикатов руды. Стеклофазы, образующиеся при обжиге окатышей, являются источником настылеобразования в шахтной печи и причиной препятствующей восстановлению магнетитовых ядер на заключительном этапе образования металлизированных брикетов.

По результатам исследовательской работы установлено, что применительно к шихтовым условиям горно-обогатительного комбината для производства полностью окисленных окатышей необходима корректировка температурно-временных параметров режима обжига с учетом термических свойств кремнийсодержащих минералов железных руд. Параметры технологического режима обжига должны соответствовать последовательно проходящим процессам сначала полного окисления шихты до гематита в зоне подогрева и только потом в зоне обжига появлению в окатышах упрочняющего их железосиликатного расплава. В результате проведенных исследований был предложен режим высокотемпературного окислительного обжига.

Для предотвращения появления в окатышах силикатной фазы с низкой температурой размягчения необходимо внести изменения в состав нерудной части шихты окатышей до образования стеклофазы с температурой плавления превышающей температуры в восстановительных зонах шахтной печи.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и совещаниях:

10-й международный симпозиум «Освоение месторождений минеральных ресурсов» (Белгород, 2009)

Международный конгресс «Доменное производство 21 век» (Москва, 2010);

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных литературных источников из 78 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 104 страницы, в том числе 32 рисунка и 11 таблиц.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 7 статей из списка, рекомендованных ВАК изданий.

**Достоверность научных результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных методов исследования и аттестованных измерительных установок и приборов. Текст диссертации и автореферат проверены на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>)

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи, приведены научная новизна и практическая значимость.

### **1. Современные представления о рудах железистых кварцитов, механизме упрочнения окатышей при окислительном обжиге и металлизации в шахтной печи**

В главе рассмотрены основные факторы, влияющие на конечный состав, микроструктуру и физико-механические свойства обожженных окисленных окатышей.

Дан анализ основных процессов минералообразования при окислительном обжиге окатышей, полученных из концентратов руд железистых кварцитов.

Проанализированы основные требования, предъявляемые к окисленным окатышам, поступающим на металлизацию и проблемы, возникшие в результате эксплуатации шахтных печей металлизации.

По результатам анализа литературных данных сформулированы следующие задачи настоящего исследования:

- исследование фазового состава и структурных особенностей руд железистых кварцитов КМА;

- анализ механизма формирования микроструктуры и минерального состава промышленных зональных окатышей, при существующем на горно-обогатительном комбинате режиме обжига. Под зональностью подразумевается наличие в окатышах двух ярко выраженных структурных композиций: неокисленного ядра, представленного магнетитом, и окисленной гематитовой оболочки, разделенных концентрическими трещинами;

- определение состава кремнийсодержащих стеклофаз – носителей прочности окисленных окатышей;

- установление роли кремний-щелочных стеклофаз в процессе металлизации окатышей в шахтной печи;

- сформулировано представление о механизме настылеобразования в шахтной печи, составе и структуре металлизированных брикетов.

## **2. Методики и аппаратура, используемые в работе**

В главе приведены методы исследований, необходимые для достижения поставленных целей.

Для исследования минералогического состава окисленных окатышей, настылей и металлизированных брикетов были использованы методы оптической микроскопии, рентгеноспектрального микрозондирования и мессбауэровской спектроскопии;

Для определения температур фазовых превращений образцов применен синхронный термический анализ

Методы определения холодной прочности на сжатие ГОСТ 24765-81 и определения истираемости во вращающемся барабане ГОСТ 15137-77 – были использованы для характеристики прочностных свойств окисленных окатышей.

## **3. Минеральный состав и микроструктура промышленных окатышей**

Настоящий раздел работы посвящен составу и свойствам промышленных окатышей, полученных в результате окислительного обжига окатышей из руд КМА. Особое внимание уделено исследованию силикатных и рудных связей окатышей – носителей прочности готовой продукции.

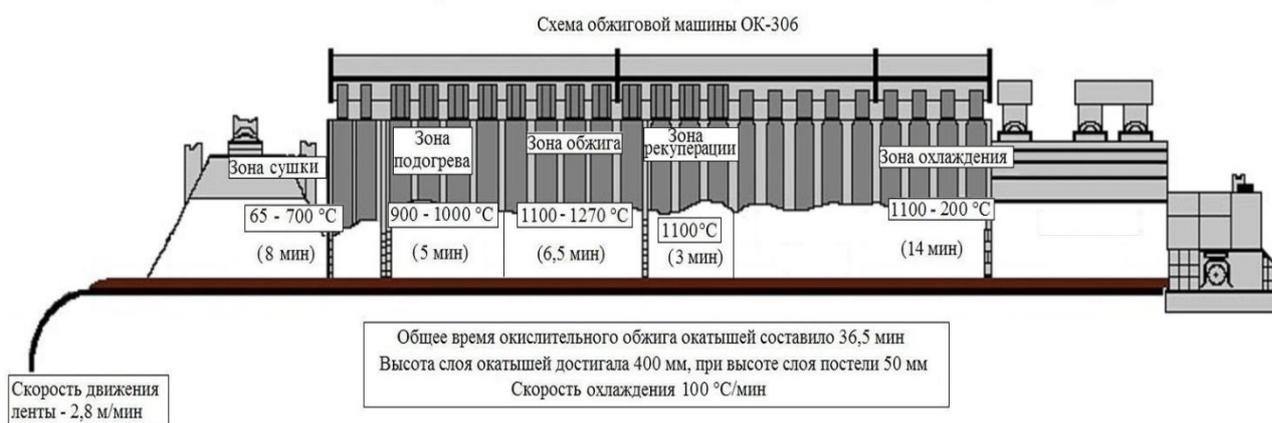
В промышленных условиях офлюсованные окатыши получали из железорудного концентрата с добавлением в шихту бентонита и флюсующей добавки, представляющей собой комбинацию известняка и боксита в соотношении 1:1 (таблица 1). Окислительный обжиг проводился на обжиговой машине ОК-306. Скорость движения ленты составляла 2,8 м/мин. Высота слоя окатышей 400 мм при высоте постели 50 мм. В зоне сушки температура возрастала от 65 до 700 °С, время сушки 8 мин, скорость нагрева 80 °С/мин. Время в зоне подогрева составляло 5 мин, при температуре 900 – 1000 °С, скорость нагрева 20 °С/мин. В зоне обжига время пребывания окатышей составляло 6,5 мин при температурах 1100 – 1270 °С. В зоне рекуперации температура была постоянной и составляла 1100 °С, время рекуперации 3 мин. В зоне охлаждения охлаждение окатышей производилось со скоростью 100 °С/мин в течение 14 мин. Затем окисленные окатыши перемещались на грохот и далее по конвейеру направлялись в цех горячего

брикетирования. Схема обжиговой машины и температурно-временные параметры окислительного обжига представлены на рисунке 1.

При существующем режиме обжига промышленных окатышей установлено, что вся продукция представлена зональными окатышами, состоящими из магнетитовых ядер и гематитовых оболочек, разделенных глубокими концентрическими и радиальными трещинами, местами выходящими на поверхность окатышей.

**Таблица 1.** Химический состав шихты окатышей

Наименование	Дозировка, %	Массовая доля компонентов, %							
		Fe <sub>общ</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Концентрат	97,18	69,50	28,25	2,58	0,1	0,09	0,18	0,02	0,03
Бентонит	0,82	3,17	0,63	54,91	15,08	6,99	1,72	1,16	2,23
Флюсующая смесь	2,0	3,75	0,20	11,37	25,31	25,68	0,56	0,37	0,23



**Рисунок 1.** Схема обжиговой машины ОК-306 и режим окислительного обжига исследуемых окатышей

При сравнительном анализе макроструктуры окатышей величина магнетитовых ядер зависела от диаметра окатышей. Самые крупные размеры ядер (6 – 8 мм) наблюдались в окатышах достигающих 10 – 12 мм в диаметре. С уменьшением диаметра окатышей до 8 – 10 мм размер магнетитовых ядер заметно уменьшался вплоть до 3 – 4 мм.

Установлено, что соотношение величин ядер и оболочек зависит также от положения окатышей по высоте и ширине спекаемого слоя. Визуально в окатышах верхнего слоя величины магнетитовых ядер минимальны.

Химический состав промышленных обожженных окисленных окатышей приведен в таблице 2.

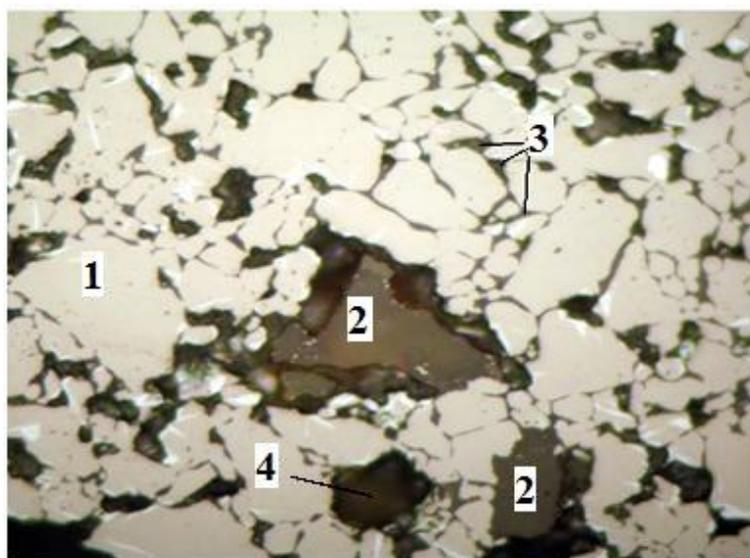
**Таблица 2.** Химический состав промышленных офлюсованных окатышей

Наименование	Массовая доля компонентов, %						
	Fe <sub>общ</sub> *	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Обоженные окатыши	66,20	3,20	0,75	0,86	0,23	0,04	0,05

\*Содержание FeO зависит от величины магнетитового ядра в составе окатыша и колеблется от 2,0 до 12,0 масс. %

При исследовании окатышей установлено, что при существующих параметрах температурно-временного режима обжига зональность окатышей закладывается на стадии твердофазного спекания шихты. В окатышах четко фиксируются ядра, в составе которых рудная фаза представлена магнетитом шихты (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) и оболочки, где магнетит окислен до гематита (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Характерно, что на стадии твердофазного спекания процессы превращения кремнийсодержащих минералов в магнетитовом ядре и гематитовой оболочке окатышей проходят одинаково.

С появлением в окатышах первых капель высококремнистого расплава на месте силикатов концентрата фазовые и микроструктурные превращения в объемах ядра и оболочки получают различное направление. Так, в магнетитовом ядре процесс формирования окатышей начинается с появления расплава. Первичный кремний-щелочной расплав в интервале температур 900 – 1000 °С активно ассимилирует обломки зерен мелких фракций магнетита, продуктов разрушения силикатных фаз концентрата и флюса. Появление в железосиликатном расплаве FeO приводит к изменению его физико-химических свойств: понижается вязкость, увеличивается подвижность, повышается его способность растворять в своем составе дополнительное количество минералов мелкой и средней фракций шихты. Жидкоподвижный, обогащенный FeO кремний-щелочной расплав блокирует магнетитовое ядро окатышей, препятствуя окислению магнетита до гематита. При охлаждении окатышей избыточное количество железа, растворенное в железосиликатном расплаве, выделяется, достраивая грани кристаллов магнетита, а на месте силикатного расплава образуются тонкие пленки стеклофаз, выполняющих роль силикатной связки магнетитовых зерен (рис. 2).



**Рисунок 2.** Минеральный состав и микроструктура ядра зональных окатышей.  
1 – магнетит, 2 – обломки зерен кварца, 3 – пленки стеклофазы, 4 – поры  
Отраженный свет, увеличение 250

В ядрах различных партий промышленных окатышей методом рентгеноспектрального микрозондирования определены химические составы стеклофаз. Установлено, что равномерно развитая между кристаллами магнетита стеклофаза в ядрах исследованных окатышей имеет близкие химические составы (таблица 3). Все высококремнистые железосиликатные связки содержат в своем составе щелочи  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ . Сумма щелочей в стеклофазах колеблется от 1,5 – 2,6 масс %, причем содержание оксида натрия всегда превышает содержание оксида калия. Следовательно, в изученных партиях промышленных окатышей в минеральном составе рудных концентратов преобладали натриевые пироксены и амфиболы. Тем не менее, среди исследованных окатышей выделялись группы ядер с различным содержанием в их составе шлаковых компонентов шихты. Так в стеклофазах с высоким содержанием оксида кремния, как правило, диагностируется повышенное содержание суммы щелочей, при небольшом количестве железа и оксида алюминия. Соотношение шлаковых компонентов в стеклофазах этой группы окатышей свидетельствует о том, что в зоне обжига железосиликатный расплав в их составе образовался в объемах шихты с повышенным содержанием высококремнистых щелочных силикатов концентрата. Одновременно среди промышленных проб обнаружены магнетитовые ядра окатышей с повышенным содержанием в стеклофазах оксидов кальция и алюминия и более низким щелочей, что свидетельствует о неравномерном распределении флюса в шихте.

**Таблица 3.** Химический состав стеклофаз в магнетитовых ядрах зональных окатышей

Номер образцов	Химический состав, % масс.									
	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe	Основность CaO/SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> O	(Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)/ SiO <sub>2</sub>
1	48,83	1,73	0,86	12,29	8,93	0,20	22,53	0,25	2,59	0,05
2	48,19	1,32	1,03	14,15	8,19	0,23	15,42	0,29	2,35	0,047
3	49,99	1,22	0,83	15,12	8,47	0,13	16,06	0,30	2,05	0,04
4	44,38	1,14	0,67	12,75	7,94	0,18	23,86	0,29	1,81	0,04
5	48,66	1,52	0,94	11,89	6,27	0,17	22,23	0,25	2,46	0,05
6	47,47	1,39	0,48	15,82	9,80	0,20	21,90	0,33	1,87	0,04

Отношение суммы щелочей к количеству оксида кремния ((Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/SiO<sub>2</sub>) в стеклофазах ядер окатышей является показателем глубины взаимодействия компонентов шихты в зоне обжига. Одинаковые показатели этого отношения 0,04 – 0,05 имеют стеклофазы близкие по химическому составу и имеющие одинаковые показатели основности, которые соответствуют основности исходной шихты окатышей. Более низкие значения отношения щелочей к оксиду кремния (0,03) имеют стеклофазы повышенной основности, с более высоким содержанием алюминия за счет добавок в шихту боксита. Об этом косвенно свидетельствует более низкое содержание в стеклофазах оксидов натрия и калия.

Некоторое несоответствие химических составов стеклофаз в различных образцах и даже близких объемах одной и той же пробы промышленных окатышей объясняется возможными колебаниями состава различных партий шихты.

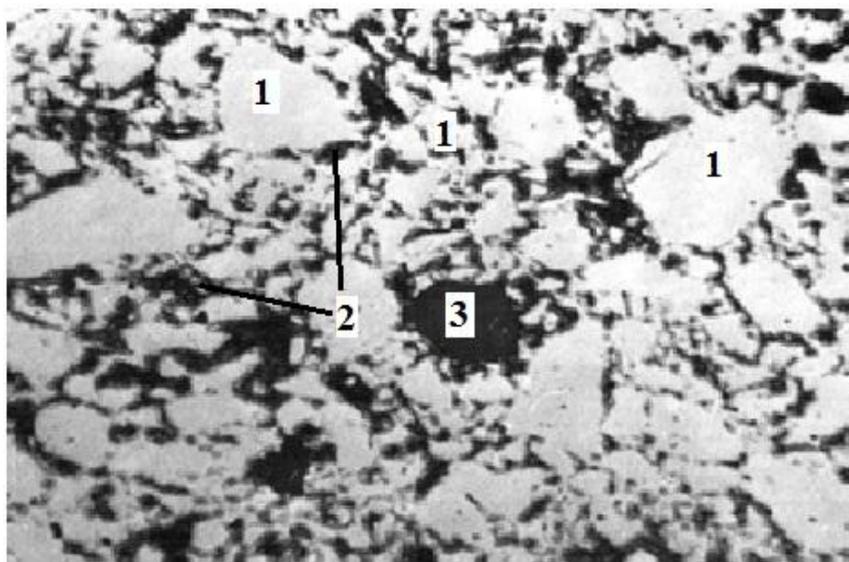
Особенностью магнетитовых ядер окатышей является достаточно большая глубина взаимодействия компонентов шихты при существующих параметрах технологического режима обжига. Из остаточных компонентов шихты вне реакции расплавообразования в окатышах остаются только обломки крупных кристаллов кварца.

Таким образом, ядра зональных окатышей представляют собой минеральную композицию зерен магнетита и железосиликатной стеклофазы сложного состава. Установлено, что все щелочи природных силикатов при окислительном обжиге переходят в силикатную стеклофазу железорудных окатышей. В исследованных пробах окатышей по данным рентгеноспектрального микрозондирования в составе кристаллов магнетита щелочи отсутствуют. В магнетите обнаружены десятые доли процента оксидов алюминия, магния и кремния.

Иначе происходит процесс упрочнения гематитовых оболочек при обжиге зональных окатышей. В оболочке окатышей механизм структурообразования первоначально связан с низкотемпературным процессом окисления мелкой фракции магнетита шихты до гематита (700 –

800 °С). При низких температурах обжига на стадии твердофазного спекания уплотненная при грануляции мелкая фракция исходного магнетита шихты (<0,1 мм) при окислении спекается и превращается в систему мелких гексагональных кристаллов гематита. С повышением температуры обжига количество игольчатых кристаллов гематита увеличивается за счет вовлечения в реакцию спекания более крупных фракций магнетита шихты. И до появления железосиликатного расплава пористая масса игольчатых кристаллов гематита заполняет и упрочняет все пространство между зернами гематита крупной фракции (рис. 3).

Температурный интервал появления первичного кремний-щелочного расплава в гематитовой оболочке окатышей аналогичен процессу силикатообразования в магнетитовом ядре. С повышением температуры обжига гематитовая мелкая фракция частично ассимилируется первичным кремний-щелочным расплавом, повышая его вязкость. Локальная форма выделений стеклофаз в петлях гематитовой связки ограничивает их роль как носителя прочности оболочки окатышей. В результате в оболочке уменьшается количество упрочняющего рудные зерна силикатного расплава, и сохраняется мелкокристаллическая гематитовая связка с тонкими пленками стеклофазы.



**Рисунок 3.** Минеральный состав и микроструктура оболочки зональных окатышей.

1 – гематит крупной и мелкой фракций, 2 – стеклофаза, 3 – зерна кварца

Отраженный свет, увеличение 250

В пленках стеклофазы гематитовой оболочки окатышей методом рентгеноспектрального микрозондирования обнаружено более низкое, чем в стеклофазе ядра, содержание оксидов кремния, алюминия и щелочей при повышенном содержании в стеклофазе оксидов магния и кальция (таблица 4).

**Таблица 4.** Химический состав стеклофаз в гематитовых оболочках окатышей

Номер образцов	Химический состав, % масс.									
	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe	Основность CaO/SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	(Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>
1	44,02	0,87	0,32	18,75	5,55	2,99	20,08	0,40	1,19	0,027
2	34,75	1,02	0,16	12,42	4,82	3,0	37,10	0,36	1,18	0,035
3	39,08	0,67	0,28	18,40	4,96	2,59	21,84	0,47	0,95	0,023
4	42,74	0,83	0,22	18,51	5,59	2,97	22,48	0,43	1,05	0,023
5	36,77	1,10	0,38	11,91	5,17	2,95	33,69	0,32	1,48	0,040
6	49,20	1,03	0,54	18,14	10,79	3,45	10,04	0,37	1,57	0,030

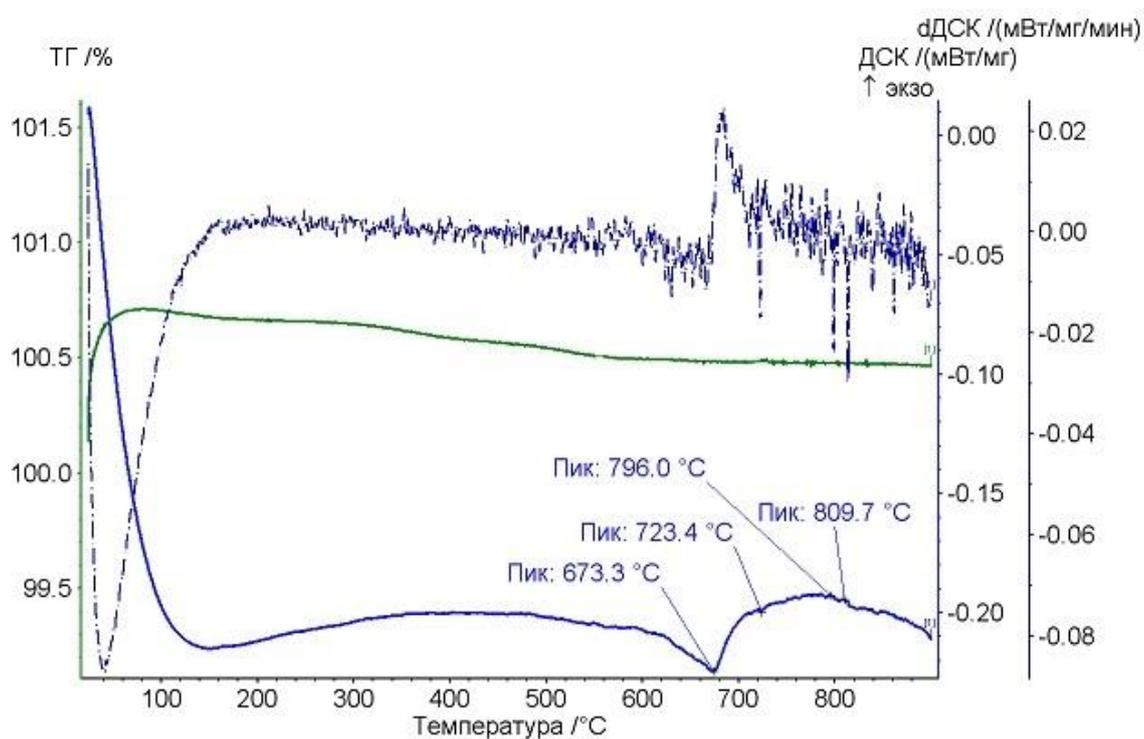
Различие составов стеклофаз ядра и оболочки косвенно свидетельствует о том, что в оболочке при термообработке отсутствовали условия выравнивания составов упрочняющего окатыши железосиликатного расплава. Непостоянство составов стеклофаз наблюдается практически в каждом из исследованных образцов промышленных окатышей. Ярко выраженное непостоянство составов кремний-щелочных стеклофаз и наличие в оболочке исходных составляющих шихты в виде кристаллов и продуктов разложения природных минералов, наряду с включениями не до конца усвоенного флюса, свидетельствует о незавершенности процесса расплавообразования в гематитовой оболочке даже в зоне высокотемпературного обжига.

Таким образом, установлено, что при существующем температурно-временном режиме обжига продуктом являются зональные окатыши, состоящие из различных рудно-силикатных композиций в виде магнетитового ядра с силикатной связкой и оболочки с гематитовой связкой и незавершенным процессом силикатообразования. При различном состоянии рудно-силикатного вещества на границе ядра и оболочки окатышей при охлаждении появляются концентрические и радиальные трещины, которые реализуются при различных видах нагрузок. Прочность на сжатие таких окатышей не превышает 1,5 – 2 кН/ок (ГОСТ 24765-81). Характерным для оболочек зональных окатышей, в составе которых носителем прочности остается гематитовая связка, является их высокая истираемость. Рудная связка оболочки окатышей, состоящая из тонких игольчатых кристаллов гематита, образовавшаяся на месте мелкой рудной фракции шихты, разрушается в результате воздействия истирающих нагрузок при складировании и транспортировке. По данным промышленных испытаний количество фракции -0,5 мм (ГОСТ 15137-77) достигает временами 10 – 15 % при норме не более 5 %.

Особую роль в окатышах выполняют стеклофазы – силикатные связки рудных зерен. Стеклофазы представляют собой сложные кремнийсодержащие аморфные образования, в составе

которых обнаружены практически все компоненты шихты: кальций, алюминий и магний флюса, кремний и щелочи силикатов руды, железо мелкой рудной фракции концентрата. Установлено, что при производстве окатышей из богатых магнетитовых концентратов (Fe 69,5; SiO<sub>2</sub> 2,6 % масс.), содержащих десятые и сотые проценты щелочей (Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O), все щелочи при термообработке переходят в стеклофазу. В исследованных окатышах, где количество стеклофазы не превышает 5 – 8 %, содержание щелочей в них составляет 1,5 – 2,5 % масс. При этом данные рентгеноспектрального микрозондирования свидетельствуют об отсутствии щелочей в рудных фазах окатышей: магнетите и гематите.

Попытка замера температуры превращения стеклофазы в окатышах была предпринята с помощью метода синхронного дифференциального термического анализа. На кривой дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) при нагреве в нейтральной атмосфере четко фиксируются пики фазовых температурных превращений рудных фаз и следы пиков температурных превращений стеклофаз. При анализе следов пиков с учетом производной ДСК интервал температурных превращений стеклофаз принят от 723 до 850 °С (рис. 4).



**Рисунок 4.** Кривые термогравиметрии (ТГ), дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и производной дифференциально-сканирующей калориметрии (dДСК)

Полученные в настоящей работе данные относительно температур превращения стеклофаз в офлюсованных окатышах КМА были сравнены с температурами размягчения силикатных фаз

аналогичных окатышей Кривого Рога, где стеклофазы размягчаются в интервале температур 740 – 800 °С.

При отсутствии технологии производства целиком окисленных окатышей роль щелочей становится решающей, поскольку раннее расплавообразование до завершения окисления шихты неизбежно становится причиной образования зональных окатышей низких прочностных свойств.

#### 4. Поведение зональных окатышей при металлизации в шахтной печи

Шахтная печь – восстановительный агрегат, где процессы металлизации проходят в режиме твердофазного спекания. Температура восстановительного газа на входе в печь составляет 930 – 935 °С при расходе газа 330 м<sup>3</sup>/т. Температура колошникового газа составляет 400 – 410 °С. Химический состав восстановительного и колошникового газов приведен в таблицах 5 и 6 соответственно. Рабочее давление составляет около 400 кПа. Схема печи и распределение температур по высоте шахты показаны на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Схема печи металлизации (установка ХиЛ-III) и распределение температур по высоте шахты

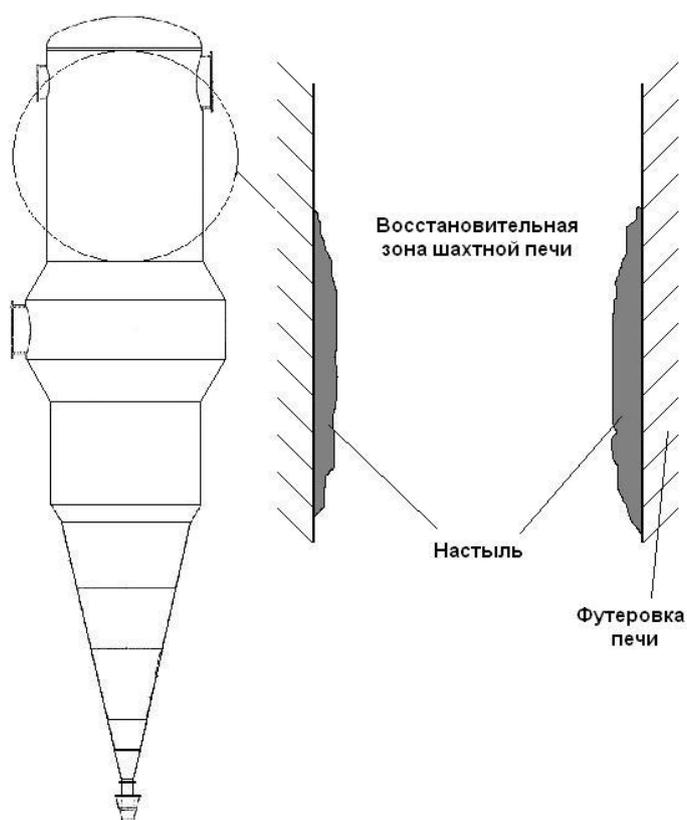
**Таблица 5.** Химический состав газа-восстановителя

Компонент	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
Содержание (% масс.)	70	16	3,8	7,2	3

**Таблица 6.** Химический состав колошникового газа

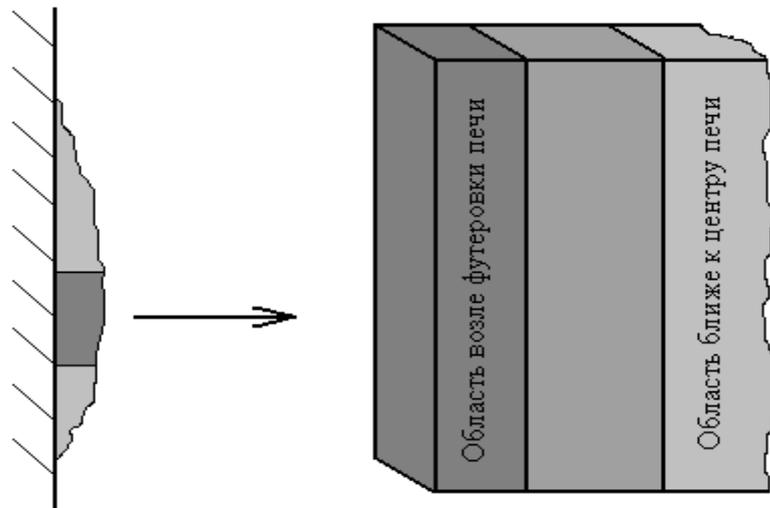
Компонент	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
Содержание (% масс.)	61	13,5	11,5	8,2	5,8

При эксплуатации шахтных печей в них в ряде случаев образуются настывы, нарушающие ход восстановительного процесса окатышей. Настыв представляет собой минеральное образование на поверхности огнеупорной кладки шахтной печи. В исследуемом случае настыв появляется в результате налипания на стенки печи продуктов разрушения зональных окатышей в процессах их восстановления. Они могут формироваться по всей высоте восстановительной зоны печи (рис. 6). При достижении определенного размера настывей шахтную печь останавливают на ремонт, а настывы ликвидируют.



**Рисунок 6.** Схема расположения настывей в восстановительной зоне печи

При остановке одной из шахтных печей для исследования были отобраны образцы настывей с целью определения фазового состава и механизма их образования. Пробы настывей, отобранные со среднего горизонта шахты печи (рис. 7), представляли собой плотные слоистые образования, где на их внешней (ближе к центру печи) стороне четко прослеживались прилипшие восстановленные до металла окатыши (рис. 8).



**Рисунок 7.** Схема отбора проб настыли со среднего горизонта шахты печи



**Рисунок 8.** Макроструктура настылей, отобранных при капитальном ремонте печи. Размер настыли уменьшен в 10 раз

При оптическом анализе образцов поперечных разрезов настылей четко фиксируется последовательная смена микроструктур в каждом из заново образующихся слоев от футеровки печи до внутренней части настыли. Настыли, расположенные ближе к футеровке, имеют мелкокристаллическое строение. По направлению к центру печи кристаллическая структура укрупняется вплоть до налипания целых окатышей.

Отобранные для исследования образцы настылей состоят из металла с тончайшими пленками стеклофаз. Предыстория различных слоев настылей сохраняется при анализе их микроструктур, сохранившихся при загрузке и восстановлении разрушенных частей окатышей (рис. 9-1, 2, 3).

В большей части образцов настыли наблюдается композиция мелких зерен металла и пленок стеклофазы характерных для гематитовых оболочек окатышей. Прослеживается микроструктура ранее существовавшей в окатышах гематитовой связки и зерна кварца, оставшиеся при обжиге окатышей вне процесса расплавообразования (рис. 9-1).

В меньшем количестве, но четко фиксируются микроструктуры ядер окатышей. Они отличаются от металлизированных оболочек окатышей крупностью зерен металла и заметно большим количеством стеклофазы по граням металлических кристаллов (рис. 9-2).

В составе сохранившихся металлизированных окатышей отобранных с внешней стороны настылей прослеживается граница двух зон промышленных окатышей ядра и оболочки (рис. 9-3).

Таким образом, сравнительный анализ микроструктур металлизированных образцов в составе настылей позволяет установить характер разрушения зональных окатышей при перегрузках и твердофазном восстановлении их в шахтной печи, и при необходимости оценить качество используемых для металлизации окатышей.

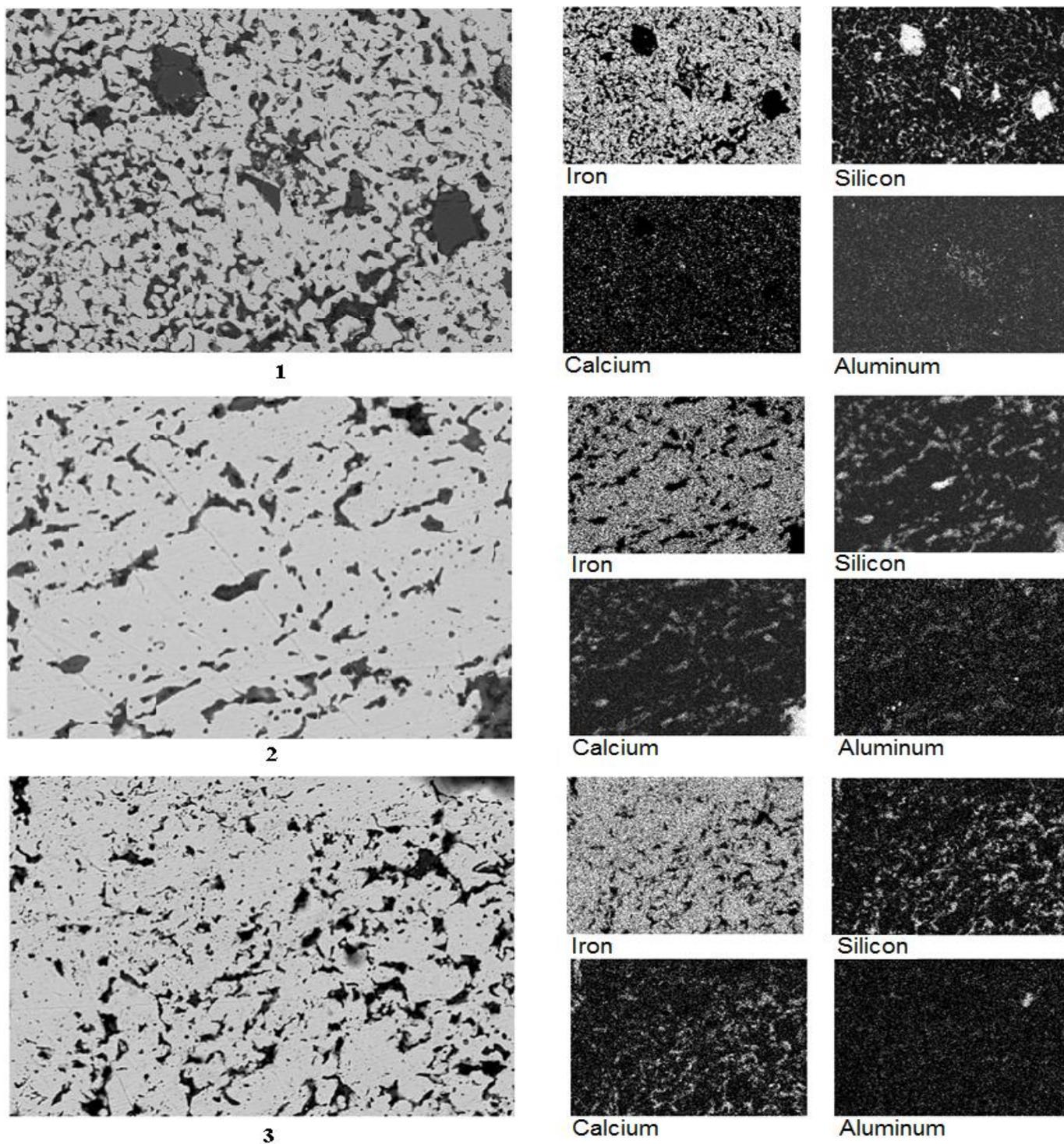
При исследовании настылей непостоянство химических составов стеклофаз выражено в значительно большей степени, чем в оболочках окисленных окатышей, поскольку, за время существования настыли, в шахтную печь загружались разные по физико-химическим и механическим свойствам окисленные окатыши. Усредненные значения химических составов стеклофаз настылей приведены в таблице 7.

**Таблица 7.** Усредненные химические составы стеклофаз в исследованных настылях

Номер образца	Содержание, % масс.									
	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe	CaO/ SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> O	(Na <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> O) /SiO <sub>2</sub>
1	31,6	1,3	0,4	10,5	5,6	1,7	38,1	0,33	1,7	0,05
2	30,0	1,0	0,8	9,2	4,2	6,3	43,1	0,31	1,8	0,06
3	27,6	1,4	0,5	7,4	5,2	2,7	50,4	0,28	1,9	0,07
4	34,5	0,9	0,6	10,0	3,5	5,6	45,7	0,30	1,5	0,04
5	68,0	3,2	4,5	5,1	14,6	1,6	3,4	0,07	7,7	0,11
6	66,5	7,0	0,7	4,0	21,0	0,3	1,9	0,06	7,7	0,11
7	62,6	6,3	1,0	7,3	20,3	1,5	1,5	0,11	7,3	0,11
8	49,5	1,9	1,9	9,5	6,7	3,8	20,7	0,20	3,8	0,08
9	50,0	2,6	1,6	8,7	8,5	3,6	19,8	0,17	4,2	0,08

По результатам анализа настылей в массе металла обнаружено совершенно беспорядочное расположение стеклофаз. По составу и форме выделения стеклофазы условно разделены на три группы. К первой группе отнесены чаще всего встречающиеся высокожелезистые стеклофазы по составу близкие к различным объемам оболочек окатышей (образцы 1 – 4 в таблице 7). В группе высокожелезистых стеклофаз сохраняется практически одинаковые показатели их основности –

0,3, сумма щелочей колеблется от 1,5 до 1,9 % масс. и во всех случаях содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  превышает количественно  $\text{K}_2\text{O}$ . Отношение суммы щелочей к  $\text{SiO}_2$ , как и в окатышах, составляет 0,04 – 0,07, что указывает на их близость к расплавам, образовавшимся при термообработке в зонах обжига окисленных окатышей.



**Рисунок 9.** Фрагменты микроструктур настывшей оболочки (1), ядра (2) и на контакте оболочки и ядра (3) окатышей, снятых в обратно рассеянных электронах и рентгеновском излучении Fe, Si, Ca, Al. Увеличение 1000

Вторая группа кремний-щелочных стеклофаз, обнаруженная в различных слоях настылей, представлена высококремнистыми фазами. В их составе преобладают три основных составляющих: оксиды кремния, алюминия и щелочей. В отличие от предыдущей группы стеклофаз у них более высокий показатель отношения суммы щелочей к оксиду кремния – до 0,11 (образцы 5 – 7 в таблице 7). Эти стеклофазы образовались в зоне обжига окисленных окатышей на месте обширной группы полевошпатовых минералов руды и остались в объемах окатышей с наименьшей глубиной взаимодействия компонентов шихты. А затем вместе с продуктами разрушения окатышей оказались в составе настылей.

При исследовании настылей нередко можно встретить стеклофазы, занимающие промежуточное положение между высокожелезистыми и высококремнистыми фазами. Установлено, что в третьей группе стеклофаз (образцы 8, 9 в таблице 7) их первичный расплав при обжиге окатышей тоже отвечал объемам шихты обогащенных обломками зерен полевого шпата, только глубина взаимодействия компонентов шихты была выше и в процессе расплавообразования принимали участие ранее образовавшиеся железосиликатные расплавы. По своему химическому составу стеклофазы третьей группы занимают промежуточное положение, как по количеству оксидов кремния и алюминия, так и по содержанию щелочей, а высокий показатель отношения суммы щелочей к оксиду кремния (0,08) свидетельствует о глубине взаимодействия компонентов шихты при окислительном обжиге окатышей.

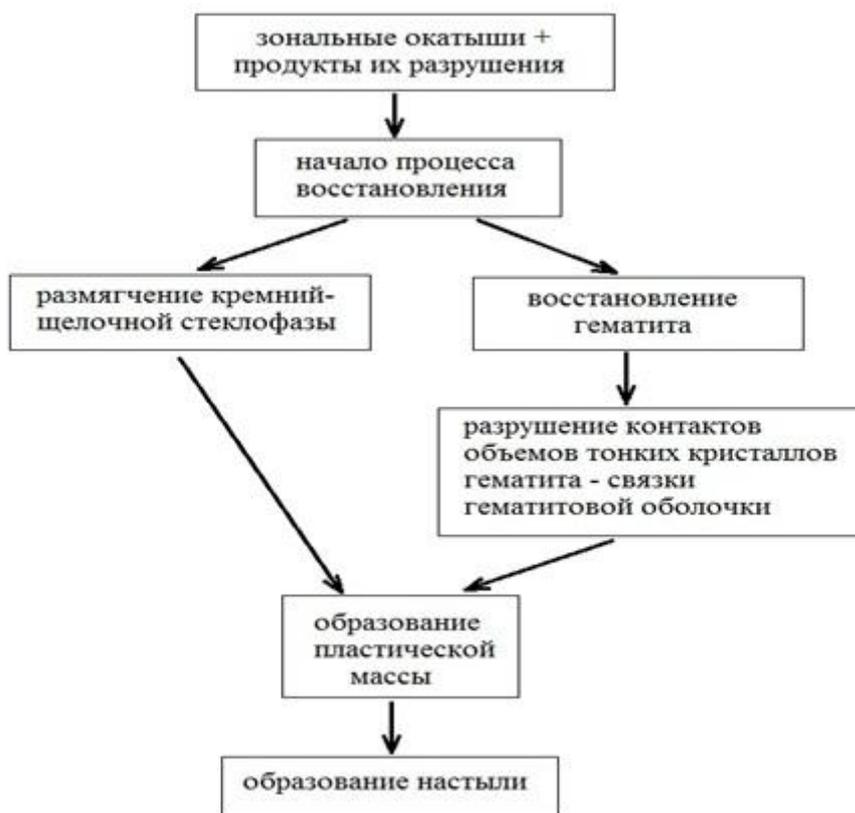
Сравнительный анализ химических составов кремний-щелочных стеклофаз в офлюсованных окатышах и в настылях свидетельствует о том, что образовавшиеся при окислительном обжиге окатышей стеклофазы сохраняются в составе настылей. Разброс составов стеклофаз, наблюдающийся в окатышах и еще больше в настылях, является причиной недостаточного усреднения железорудной шихты и низкой глубины взаимодействия рудных, силикатных составляющих и флюса в существующем в настоящее время технологическом режиме обжига окатышей.

Результаты исследования механизма упрочнения при окислительном обжиге окатышей и поведения их в шахтной печи позволяют предложить механизм образования настылей. При перегрузках до шахтной печи продуктами разрушения окатышей являются обломки магнетитовых ядер и гематитовых оболочек с различным количеством стеклофаз. Высокая истираемость окисленных окатышей связана с наличием в оболочке гематитовой связки системы тонких кристаллов гематита, образовавшихся в процессе окисления окатышей на месте мелкой рудной фракции шихты. В шахтную печь поступают целые окатыши и мелкие фракции продуктов их разрушения.

В верхних горизонтах печи в первую очередь восстанавливаются и рушатся точечные контакты тонких кристаллов гематита оболочки окатышей. Процесс разрушения гематитовой

связки оболочек окатышей и размягчение низкотемпературных кремний-щелочных стеклофаз в шахтной печи происходят практически одновременно. При этом на месте стеклофазы и продуктов восстановления гематита образуется вязкопластическая масса. Процесс появления в шахтной печи размягченного материала является началом настylieобразования (рис. 10).

Вязкопластическое состояние стеклофазы в самом начале восстановительного процесса позволяет предположить, что именно низкотемпературные кремний-щелочные стеклофазы, образовавшиеся при термообработке окатышей в зоне обжига, являются основными «строителями» настylieй в шахтной печи. Величина настylieй возрастает с каждой последующей загружаемой в шахтную печь партией обожженных окатышей. В каждом вновь появившемся слое настylieй появление металла затормаживает процесс первичного настylieобразования. И тогда при продолжающемся процессе металлизации в составе настylieй кремний-щелочные стеклофазы оказываются «запакованными» в металл и в течение существования настylieй их состав остается без изменения.



**Рисунок 10.** Схема образования настylieй в шахтной печи

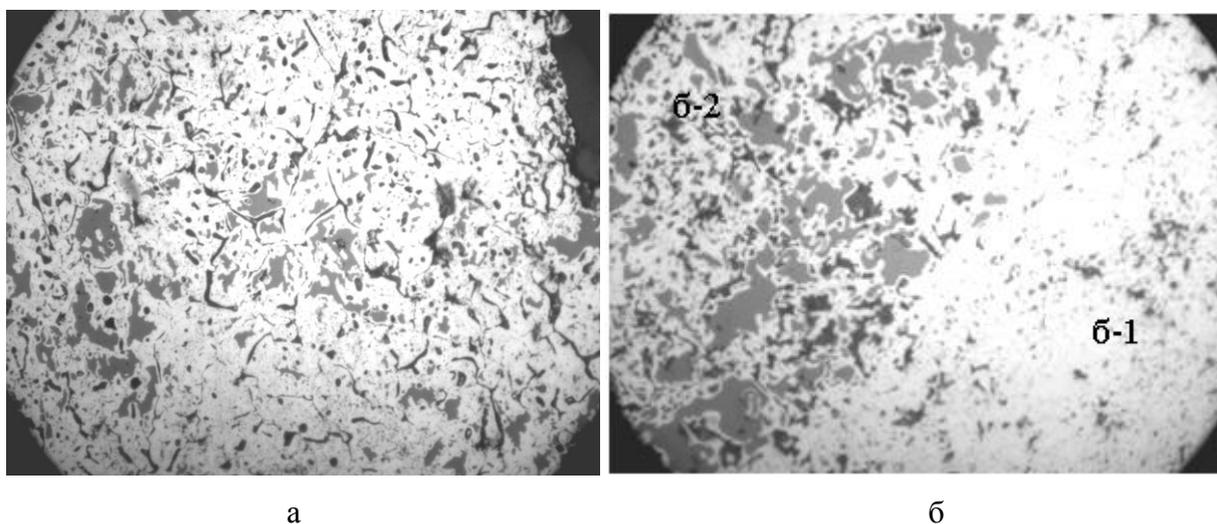
Следовательно, особенностью шахтного процесса при использовании зональных окатышей из концентратов руд железистых кварцитов, содержащих щелочи, является активное настylieобразование, нарушающее ход восстановительного процесса. Причиной

настылеобразования является наличие в составе окатышей низкотемпературной кремний-щелочной стеклофазы наряду с гематитовой связкой оболочки, не выдерживающих перегрузок при транспортировке от обжиговой машины до шахтной печи, и разрушающаяся при восстановлении в верхних горизонтах шахтной печи. Совместное присутствие в шихте шахтной печи рудной мелочи и вязкопластических силикатных масс становятся причиной роста настылей при каждой загрузке печи зональными окатышами.

Металлизированные окатыши в составе брикетов по сравнению с окатышами в настылях различаются временем пребывания их в восстановительных условиях шахтной печи. Время металлизации окатышей в шахтной печи составляет 4-6 часов.

При оптическом анализе продольных и поперечных разрезов металлизированных брикетов в их составе наряду с металлом и стеклофазой диагностируется вюстит, образовавшийся на месте магнетитовых зерен в ядрах зональных окатышей.

В брикетах в участках металла и металла с вюститом сохраняются тонкие пленки стеклофазы по форме выделения и химическому составу близкие к стеклофазам магнетитовых ядер окисленных окатышей и стеклофаз часто встречающихся в настылях шахтной печи (рис. 11). В образцах металлизированных брикетов содержание в стеклофазе главных расплавообразующих компонентов колеблется в небольших пределах (таблица 8)



а – металл и вюстит на месте ядра окатыша; б – граница восстановленной до металла зоны оболочки (б-1) и ядра (б-2) окатыша

**Рисунок 11.** Фрагменты микроструктур участков металлизированных брикетов.

Белый – металл, серый – вюстит, черный – пленки стеклофазы

Отраженный свет, увеличение рис. а – 500; рис. б – 1000

**Таблица 8.** Средние значения химических составов кремний-щелочных стеклофаз в объемах различных брикетов

Номер образца	Содержание, % масс.									
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe	CaO/ SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> O	(Na <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> O)/ SiO <sub>2</sub>
1	30,8	11,6	3,2	1,2	0,8	0,4	39,0	0,37	1,2	0,04
2	32,7	8,8	3,8	3,0	1,4	0,7	38,0	0,20	2,1	0,06
3	36,6	12,4	2,9	1,7	1,0	0,4	33,4	0,34	1,4	0,04

Установлено, что кремний-щелочные стеклофазы, обнаруженные в брикетах, имеют основность CaO/SiO<sub>2</sub> одинаковую с основностью окисленных окатышей. В их составах наблюдается одинаковое с окисленными окатышами превышение количества оксида натрия над оксидом калия и главное, сохраняется показатель отношения суммы щелочей к оксиду кремния близкий к 0,04 – 0,06. Следовательно, кремний-щелочные стеклофазы, образовавшиеся в зоне окислительного обжига окатышей, сохраняют свой состав в последующих твердофазных процессах восстановления в шахтной печи. Необходимо отметить, что причиной некоторого разброса значений химических составов стеклофаз в промышленных окатышах остается непостоянство составов исходных шихт. Эти же колебания составов стеклофаз сохраняются в металлизированных брикетах и еще в большей степени в настылях.

Таким образом, на заключительном этапе процесса металлизации в шахтной печи до металла полностью восстанавливается большая часть оксидов железа окатышей. В массе металла брикетов сохраняются участки невосстановленного вюстита, представляющие в зональных окатышах магнетитовые ядра. И главное, что при использовании в шихте магнетитовых концентратов в составе металлизированных брикетов практически без изменения остаются кремний-щелочные стеклофазы, образовавшиеся при окислительном обжиге окатышей.

Железистые кварциты содержат в своем составе щелочные силикаты. Как правило, в богатых магнетитовых концентратах содержание щелочей (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) не превышает сотых и десятых долей процента, что позволяло не учитывать их при разработке процессов получения техногенного сырья.

Проведенные исследования фазовых превращений железорудной шихты при окислительном обжиге окатышей и процессах металлизации их в шахтной печи позволяют определить роль щелочей на каждом из этапов изученного металлургического передела.

Превращение высококремнистых щелочных силикатов руды в стеклофазу – связку окатышей происходит при окислительном обжиге на стадии жидкофазного упрочнения. В состав

стеклофазы переходят нерудные компоненты шихты, включая щелочи и железо мелкой фракции концентрата. Для стеклофазы характерны низкие температуры размягчения.

При производстве окисленных окатышей появление низкотемпературного щелочесодержащего железосиликатного расплава является границей технологических зон подогрева и высокотемпературного обжига. В случае недоокисления шихты в зоне подогрева расплав блокирует магнетитовое ядро и становится причиной образования зональных окатышей, обладающих низкими прочностными свойствами.

Стеклофаза с температурой размягчения 723 – 850 °С, что ниже температур в основных зонах шахтной печи (750 – 900 °С), при восстановительной обработке окатышей превращается в вязко-пластическую массу, которая становится основным «строителем» настылей, нарушающих процесс металлизации.

При использовании в шахтной печи зональных окатышей стеклофаза, находясь в вязкопластическом состоянии, затормаживает процесс металлизации магнетитовых ядер, в результате чего в металлизированных брикетах на месте зерен магнетита сохраняется фаза вюстита.

Сравнительный анализ химических составов стеклофаз в промышленной продукции: окатышах, настылях и металлизированных брикетах, свидетельствует об отсутствии признаков изменения их состава при твердофазных процессах металлизации в шахтной печи.

При использовании концентратов руд железистых кварцитов, содержащих в своем составе высококремнистые щелочесодержащие силикаты, с целью производства окисленных окатышей с последующей металлизацией их в шахтной печи необходимо:

- внести изменения в температурно-временные параметры обжига с целью окисления магнетита концентрата во всем объеме окатыша и достижения полного взаимодействия шлаковых компонентов шихты в зоне обжига. При этом параметры технологического режима обжига должны соответствовать последовательно проходящим процессам сначала окисления магнетита шихты до гематита и только потом появлению в окатышах упрочняющего их железосиликатного расплава.

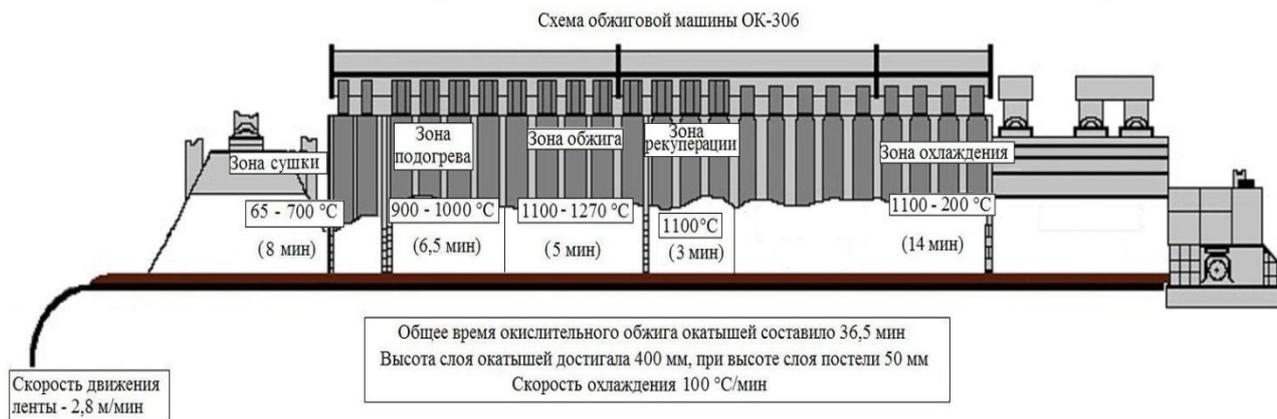
- предположительно для ограничения процесса низкотемпературного настылеобразования требуется повысить температуры размягчения кремний-щелочных стеклофаз в составе окатышей.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ**

При существующих на горно-обогатительном комбинате шихтовых и технологических условиях окислительного обжига комбинат производит зональные окатыши низких прочностных свойств, состоящие из магнетитового ядра и гематитовой оболочки с незавершенным процессом расплавообразования.

С целью получения гематитовых окатышей высоких прочностных свойств необходимо внести изменения в температурно-временные параметры режима окислительного обжига с учетом термических свойств силикатных фаз магнетитового концентрата, при этом не снизив производительность обжиговой машины.

Для этого следует увеличить время пребывания окатышей в зоне подогрева с 5,0 до 6,5 мин, сократив при этом время нахождения окатышей в зоне высокотемпературного обжига до 5,0 мин (рис. 12). На рисунке 13 показано различие между температурно-временными параметрами окислительного обжига окатышей.



**Рисунок 12.** Температурно-временные параметры режима обжига для получения целиком окисленный окатыш с равномерно распределенной стеклофазой.



**Рисунок 13.** График, показывающий различие между существующим и предложенным режимами окислительного обжига окатышей.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В работе на примере руд железистых кварцитов КМА показаны реальные процессы фазовых превращений от руды до металлизированного продукта, включающие окислительный обжиг окатышей и металлизацию их в шахтной печи;

2. Установлено, что промышленные окатыши имеют зональную макроструктуру. Они состоят из магнетитовых ядер и гематитовых оболочек. Зональные окатыши характеризуются низкими показателями прочности на сжатие 1,5 – 2,0 кН/ок и высокой истираемостью при складировании и перегрузках, выход фракции < 3,0 мм превышает 5 – 10 %;

3. Установлены причины образования в промышленных условиях зональных окатышей. Показано, что при существующих температурно-временных параметрах режима обжига зональность формируется на стадии твердофазного спекания шихты в результате недоокисления центральных участков окатышей. Низкотемпературный кремний-щелочной расплав, появившийся до завершения процесса окисления шихты, блокирует магнетитовое ядро, препятствуя завершению окисления окатышей в высокотемпературных зонах обжига;

4. Показано, что в процессе производства окатышей на стадии жидкофазного упрочнения кремний-щелочные силикаты магнетитового концентрата целиком переходят в состав железосиликатного расплава окатышей, а при охлаждении образуют связки рудных зерен в виде стеклофаз, в составе которых количество щелочей достигает 1,5 – 2,5 % масс. Кремний-щелочные стеклофазы окатышей имеют низкие температуры размягчения. Температурный интервал их размягчения составляет 723 – 850 °С. Установлено, что в составе рудных фаз магнетите и гематите щелочи отсутствуют;

5. Особенностью шахтного процесса при использовании зональных окатышей из концентратов руд железистых кварцитов является активное настылеобразование, нарушающее ход восстановительного процесса. Причина настылеобразования - наличие в окатышах кремний-щелочной стеклофазы с температурой размягчения ниже, чем температуры в основных зонах шахтной печи;

6. Предложен механизм настылеобразования при металлизации зональных окатышей в шахтной печи. Установлено, что в начале восстановительного процесса разрушение окатышей, восстановление фрагментов рудных фаз и размягчение стеклофаз, образовавшихся при термообработке окатышей, происходят практически одновременно. Появление в шахтной печи вязкопластического материала является началом настылеобразования, при этом жидкопластические массы становятся основным «строителем» настылей. Процесс настылеобразования при каждой следующей загрузке окатышей в шахтную печь повторяется;

7. При исследовании металлизированных брикетов в массе металла обнаружены ядра окатышей, где процесс восстановления магнетита ограничен появлением вюстита. Существование в металлизированных брикетах вюстита является следствием наличия в шахтной печи стеклофазы в вязко-пластическом состоянии, которая, как и в случае производства зональных окатышей на обжиговой машине блокирует магнетитовые ядра, препятствуя их полной металлизации;

8. Высокое качество окатышей из концентратов руд железистых кварцитов может быть достигнуто при условии осуществления температурно-временного режима обжига, предусматривающего полное окисление шихты в подогреве с завершением процесса расплавообразования в высокотемпературной зоне обжига. По результатам исследования был предложен режим высокотемпературного окислительного обжига.

### **Список публикаций по материалам диссертации**

1. Критерии качества железорудных окатышей из концентратов руд магнетитовых кварцитов. Ю. С. Юсфин, Т. Я. Малышева, С. В. Плотников. // Известия вузов. Черная металлургия, №5, 2009, с. 7-10. Steel in translation, vol. 39, №5, 2009, pp. 375-378.

2. Механизм фазовых превращений при окислительном обжиге промышленных окатышей из концентратов руд железистых кварцитов. Плотников С. В., Бормотов А. С. // Известия вузов. Черная металлургия, №3, 2011, с. 29-32.

3. Минеральная форма  $\text{SiO}_2$  руды – индикатор процесса упрочнения железорудных окатышей. Малышева Т. Я., Плотников С. В. // Металлург, №8, 2011, с. 35-38.

4. Технологические аспекты производства окатышей из магнетитовых руд. Т.Я. Малышева, Ю.С. Юсфин, С.В. Плотников. // Известия вузов. Черная металлургия, №9, 2011, с. 3-5.

5. Влияние щелочей на механизм упрочнения окатышей из концентратов руд железистых кварцитов. Т.Я. Малышева, Ю.С. Юсфин, С.В. Плотников. // Известия вузов. Черная металлургия, №11, 2011, с. 15-19.

6. Механизм насталеобразования при металлизации окатышей из концентратов руд железистых кварцитов. Т. Я. Малышева, Ю. С. Юсфин, С. В. Плотников. // Известия вузов. Черная металлургия, №3, 2012, с. 20-24. Steel in translation, vol. 42, №3, 2012, pp. 219-223.

7. Структурные особенности и физико-механические свойства неофлюсованных окатышей из магнетитовых концентратов. Малышева Т. Я., Плотников С. В., Никитченко Т. В., Гзогян Т. Н. / Материалы X международного симпозиума по освоению месторождений минеральных ресурсов и подземному строительству в сложных гидрогеологических условиях. Белгород, 25 – 29 мая 2009, с. 317-323.

8. Структурные особенности и физико-механические свойства нефлюсованных окатышей Лебединского ГОКа. Плотников С. В. / Сборник тезисов 64-е дни науки МИСиС. Москва, 2009, с. 120-121.

9. Современное представление о влиянии офлюсования окатышей на ход доменной печи. Малышева Т. Я., Плотников С. В. / Труды международного конгресса доменщиков «Доменное производство – XXI век». 12 – 16 апреля, 2010, с. 106-108; Сталь, №4, 2010, с. 29; Сборник тезисов 65-е дни науки МИСиС. Москва, 2010, с. 120-122.

10. Влияние качества окатышей на образование настывлей в шахтной печи. Плотников С. В. / Сборник тезисов 66-е дни науки МИСиС. Москва, 2011, с. 87-89.