

На правах рукописи



**Закуцкая Любовь Анатольевна**

**Научно обоснованные технологические решения комплексного использования  
кремниймарганцевых руд Ниязгуловского месторождения в металлургии  
чёрных металлов**

Специальность 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Магнитогорск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель доктор технических наук, доцент  
Харченко Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: **Заякин Олег Вадимович**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, ФГБУН «Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук», заведующий лабораторией стали и ферросплавов

**Спирин Николай Александрович**, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра теплофизики и информатики в металлургии, заведующий кафедрой.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Защита состоится 22 апреля 2025 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Мезин Игорь Юрьевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации от 28.12.2022 в условиях наложенных санкций Российская Федерация должна иметь технологический суверенитет по основным отраслям промышленности. Производство ферросплавов, в частности на основе марганца, в значительной степени зависит от импортного сырья. Для их выплавки в полном объеме марганецсодержащие сырье ввозится в Российскую Федерацию из стран ЮАР и Габон. В настоящее время импортные поставки марганцевого концентрата в РФ составляют более 1 млн. тонн. Наша страна производит в год около 300 тыс. тонн ферросиликомарганца, при этом потребность металлургических предприятий страны составляет около 500 тыс. тонн/год.

В то же время минерально-сырьевая база марганцевых руд Российской Федерации может служить серьезным дополнительным источником для производства ферросиликомарганца. В нашей стране балансовые запасы марганцевой руды составляют 283,3 млн. тонн, в том числе разведанные месторождения включают 137,3 млн. тонн. На Южном Урале выявлено более ста месторождений кремниймарганцевых руд общим прогнозным количеством около 10 млн. тонн. Однако данные месторождения не рассматривают в качестве сырья для получения ферросиликомарганца с последующим применением его в сталеплавильном производстве в связи с их малыми размерами и низким содержанием марганца в рудах. В небольших количествах ее вовлекают в состав шихты доменных печей для промывки горна от спели и мелочи кокса и высокоосновных минералов. При этом ее загрузка осуществляется без учета выявления локальных зон горна с наилучшей фильтрующей способностью коксовой насадки, что снижает эффективность ее использования в доменных печах. Кроме того, образовавшиеся в процессе подготовки руды к доменному переделу мелкие фракции не вовлекаются в производство, что уменьшает полноту использования таких руд. В связи с этим, на сегодняшний день, направление, связанное с расширением сырьевой базы металлургических предприятий региона использованием бедного марганцевого сырья является актуальным.

### **Степень разработанности темы исследования**

Проведенный литературно-патентный обзор по производству кремниймарганцевых ферросплавов в Российской Федерации, а также существующим практикам промывки горна доменных печей показал целесообразность разработки технологических решений комплексного использования кремниймарганцевых руд, в том числе месторождений Южно-Уральского региона в металлургическом переделе.

**Цель работы** – разработка и научное обоснование технологических решений, обеспечивающих комплексное использование бедных

кремниймарганцевых руд Ниязгуловского месторождения при производстве металла для расширения сырьевой базы металлургических предприятий.

### **Задачи**

- проанализировать сырьевую базу и основные характеристики комплексных кремниймарганецсодержащих руд;
- оценить химический и фазовый состав кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в исходном состоянии и после твердофазного восстановления;
- установить зависимости очередности поступления кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в колошниковое пространство доменных печей физическим и математическим моделированием для различных режимов загрузки;
- разработать, обосновать и внедрить рациональные режимы использования кремниймарганцевой руды в доменных печах;
- исследовать твердофазные и жидкофазные процессы восстановления кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения индивидуально и в смеси с богатым сырьем.

### **Научная новизна работы**

1. Определены зависимости доли кремниймарганцевой руды в объеме шихты, поступающей в колошниковое пространство из лоткового загрузочного устройства (ЗУ), от места размещения ее в бункере ЗУ и углового положения лотка для условий одно- и двухскипового режимов загрузки.
2. Установлено влияние локального размещения марганцевой руды в колошниковом пространстве печи на эффективность промывки коксовой насадки в горне. В условиях работы печи на коксе с горячей прочностью CSR более 40 % целесообразность промывки вызвана осложнением движения жидких продуктов плавки через слой кокса в зоне с повышенной рудной нагрузкой. При работе печи с горячей прочностью CSR менее 40 % затруднение движения чугуна и шлака через слой кокса в осевой зоне возникает при ухудшении его качества более чем на 0,5 %.
3. Выявлена закономерность изменения степени извлечения марганца и кремния в металл при росте доли кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в составе шихты. При увеличении ее содержания в шихте от 30 до 100 % степень извлечения марганца уменьшилась на 42,9 % отн. при росте степени извлечения кремния на 49,8% отн.

### **Практическая ценность и реализация результатов**

Полученные в работе результаты позволили повысить эффективность использования кремниймарганцевой руды при промывке горна доменных печей ПАО «ММК», оснащенных бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) лоткового типа. Внедрены эффективные режимы загрузки материалов, обеспечивающих рациональную промывку локальных зон горна с наилучшей дренажной способностью коксовой насадки.

Применение разработанного режима по загрузке обеспечивало повышение производительности печи в среднем на 0,48 % и снижение удельного расхода кокса в среднем на 0,43 % на каждые 10 кг/т чугуна кремниймарганцевой руды в интервале 21,4-40,6 кг/т чугуна.

Разработанные технологические решения позволяют использовать кремниймарганцевое сырье крупных и мелких фракций, обеспечивая комплексность переработки таких руд.

### **Методология и методы исследования**

В работе применяли методы физического и математического моделирования с соблюдением критериев подобия, экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях. Химический состав исходных руд и полученных продуктов определяли полуколичественным методом с помощью программы UniQuant на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре «ARL QUANT X». Фазовый состав исходных руд и после твердофазного восстановления исследовали методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре «SHIMADZU XRD-7000».

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Зависимости распределения кремниймарганцевой руды в колошниковом пространстве доменной печи для различных условий размещения ее в бункере лоткового ЗУ при загрузке совместно с железорудным сырьем.
2. Эффективные, технологически и научно обоснованные режимы загрузки кремниймарганцевой руды для промывки горна в зависимости от горячей прочности кокса.
3. Зависимости степеней восстановления марганца и кремния от доли кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в составе шихты.

### **Достоверность полученных результатов**

Подтверждается использованием ГОСТ 25732-88, 22772.0-96, 16598-80 в процессе исследований физико-механических свойств кремниймарганцевой руды, применением критериев подобия при моделировании режимов загрузки кремниймарганцевой руды на модели лоткового ЗУ, многовариантными промышленными экспериментами при исследовании различных режимов загрузки кремниймарганцевой руды, использованием современной электрической вертикальной печи с рамой, реакционной камерой и весовой системой фирмы «Лесо» при моделировании твердофазного восстановления, индукционной печи ИСТ-0,06 при жидкофазном процессе.

### **Личный вклад автора**

Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором и при его непосредственном участии. Вклад автора заключается в формулировании структуры работы, проведении лабораторных исследований процессов твердофазного водородного и жидкофазного карботермического восстановления кремниймарганцевых руд и промышленных экспериментов по выявлению

рациональных режимов их загрузки в доменную печь в качестве промывочного материала, математической обработке данных, анализе и интерпретации результатов исследования, формулировке основных положений и выводов.

### **Апробация работы**

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XIX Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Аша, 2024 г), XVII Международном конгрессе сталеплавыльщиков и производителей металла (Магнитогорск, 2023 г), Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов» имени академика А.М. Самарина (Выкса, 2022 г), VI Конгрессе с международным участием «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Екатеринбург 2023 г), 76-78, 80-82-й Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2018-2020, 2022-2024 гг.), XVIII Международной научно-технической конференции молодых специалистов (Магнитогорск, 2018 г).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных трудов, из них 4 публикации в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 153 наименований и 1 приложения. Изложена на 127 страницах машинного текста, содержит 17 рисунков и 47 таблиц.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обозначена актуальность тематики исследований, установлены цель работы, задачи, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** проанализированы научные публикации, отражающие классификацию и объем сырьевой базы кремниймарганцевых руд Южного Урала, представлен аналитический обзор современного состояния вопроса получения ферросиликомарганца, опыт использования марганцевых руд при промывке горна доменных печей.

Из анализа изученных работ следует целесообразность разработки технологических решений, обеспечивающих эффективную промывку горна доменных печей использованием в составе шихты крупных фракций бедной кремниймарганцевой руды месторождений Южно-Уральского региона, и утилизацию мелкой фракции вовлечением ее в схему производства ферросиликомарганца. Опираясь на результаты литературного обзора, сформированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** представлена схема комплексной переработки бедной кремниймарганцевой руды Нязгуловского месторождения (рис. 1).



Для уточнения отдельных звеньев предлагаемой схемы приведены методики лабораторных экспериментов предварительного твердофазного и жидкофазного восстановления кремниймарганцевой руды с получением ферросиликомарганца, лабораторных исследований на физической модели загрузочного устройства лоткового типа и промышленных испытаний на доменных печах № 6 и 10 ПАО «ММК» с выявлением рациональных режимов загрузки, обеспечивающих эффективную промывку горна от спели и мелочи кокса.

Определен химический (табл. 1) и минералогический состав руды Ниязгуловского месторождения.

Таблица 1 – Химический состав исследованной Ниязгуловской кремниймарганцевой руды

Содержание элемента / оксида, %													
Mn <sub>общ</sub>	MnO	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>общ</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	ППП
17,90	6,08	18,95	12,73	0,23	17,93	2,67	0,35	0,11	46,23	2,54	0,09	0,09	4,77

Фазы, обнаруженные в руде при качественной идентификации в значимых количествах, представлены на рисунке 1. В исходной руде марганец в основном находился в форме браунита  $(Mn^{+2}Mn^{+3})SiO_{12}$  с подчиненными количествами родохрозита  $MnCO_3$  и пьемонтита  $Ca_2MnAl_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ , а железо – в виде гематита  $Fe_2O_3$ . Вмещающая порода была представлена в основном кварцем  $SiO_2$ .

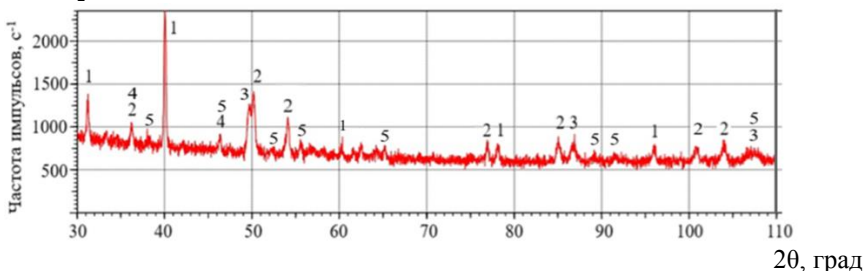


Рисунок 2 – Дифрактограмма исходной кремниймарганцевой руды с обозначением основных фаз: 1 –  $SiO_2$ , 2 –  $Fe_2O_3$ , 3 –  $MnO \cdot (Mn_2O_3)_3 \cdot SiO_2$ ; 4 –  $MnCO_3$ ; 5 –  $Ca_2MnAl_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$

Результаты термогравиметрического исследования и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), проведенные на синхронном термоаналитическом приборе STA (Jupiter 449 F3) фирмы NETZSCH, свидетельствуют о наличии в руде в небольших количествах (меньше предела обнаружения методом рентгеновской дифрактометрии) гидратированных оксидов и силикатов железа и марганца, а также гидратированных алюмосиликатов, разлагающихся в широких температурных интервалах.



В то же время на кривой ДСК зарегистрированы индивидуальные эндотермические пики, указывающие на деструкцию фаз, присутствующих в образце в достаточных для выявления на рентгенограмме количествах.

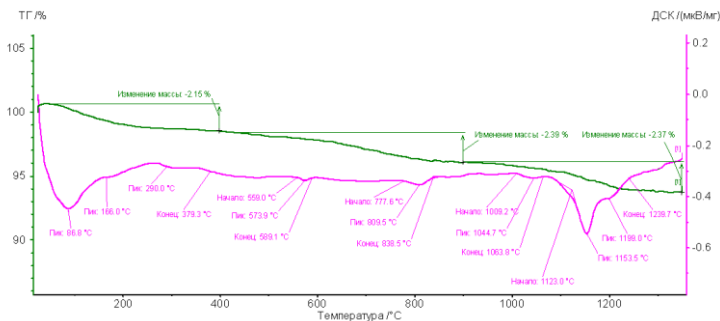


Рисунок 3 – Термограмма руды Ниязгуловского месторождения

Исследовали распределение кремниймарганцевой руды в колошниковом пространстве применительно к доменным печам №№ 6 и 10 ПАО «ММК». Для различных условий загрузки математическим моделированием результатов, полученных при физическом испытании на модели совместной выгрузки кремниймарганцевой руды и железорудного сырья, включающего агломерат, окатыши и другие добавочные материалы, оценивали долю кремниймарганцевой руды, поступающей в локальную зону колошникового пространства печи с лотковым загрузочным устройством.

Проведено исследование 29 периодов работы доменных печей № 6 и 10, отличающихся вариантами загрузки кремниймарганцевой руды в колошниковое пространство печи. Ее загружали в зону с повышенной рудной нагрузкой к периферии и в зону с пониженной рудной нагрузкой. Изменения технико-экономических показателей работы печей, в том числе изменение дренажной способности кокса в горне, позволили оценить эффективность загрузки кремниймарганцевой руды

В лаборатории кафедры МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова» исследовали твердофазное и жидкофазное восстановление кремниймарганцевой руды. В печи фирмы LECO исследовали восстановление кремниймарганцевой руды крупностью 3-10 мм массой 1 кг в среде водорода с расходом 20 л/час при температуре 900 и 1100 °С. Опыт проводили до прекращения убыли массы.

Лабораторные эксперименты по жидкофазному восстановлению марганецсодержащих материалов проводили в индукционной печи ИСТ-0.06.

Состав железорудной части шихты включал:

- сырую кремниймарганцевую руду Ниязгуловского месторождения;
- предварительно восстановленную кремниймарганцевую руду Ниязгуловского месторождения;

- смесь сырой кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения и Габонского концентрата в соотношениях, выявленных в результате расчетов.

Расход коксика составлял 50 % от массы руды. Процесс выплавки ферросиликомарганца осуществляли в тиглях вместимостью 300 г. За одно испытание в печь помещали 4 тигля одновременно. Заданную температуру процесса 1500-1550 °С, обеспечивали постоянным уровнем мощности установки, равной 40 кВт. Время выдержки металла при заданной температуре изменяли от 1 до 2,5 часов с интервалом в 30 минут.

Для оценки применимости результатов лабораторного эксперимента в промышленных условиях дополнительно провели жидкофазное восстановление производственной шихты с принятым избытком восстановителя. Железородная часть шихты включала 72 % габонского концентрата, 26 % кварцита и 2 % доломита.

В результате при продолжительности выплавки 1,5 часа получили ферросиликомарганец с максимальным содержанием марганца и кремния, равным соответственно 57,5 и 12,9 %. Для адаптации результатов лабораторных испытаний к промышленным условиям приняли поправочные коэффициенты, равные 1,14 для марганца и 1,3 для кремния.

**В третьей главе** представлены результаты промышленных исследований на доменных печах №№ 6 и 10 ПАО «ММК» по разработке и обоснованию рациональных режимов загрузки кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения для обеспечения эффективной промывки горна от спели, мелочи кокса и высокоосновных минералов. Приведены результаты физического и математического моделирования режимов загрузки кремниймарганцевой руды в шахтную печь (на примере доменной) компактным бесконусным устройством лоткового типа.

По результатам моделирования (физического и математического) различных систем загрузки кремниймарганцевой руды лотковым устройством в колошниковое пространство установили уравнения, описывающие долю кремниймарганцевой руды, поступающей на порядковую станцию лотка, в строке матрицы в зависимости от размещения ее в бункере БЗУ:

- Для условий односкиповой загрузки,  $R^2 = 0,85$ ,

$$P_{Mn}^{1 \text{ скип}} = 190,9 - 111,8N_{об} - 4,2A_{ок} + 4N_{об}A_{ок} + 5,3N_{об}^3 - 0,7N_{об}^2A_{ок} \quad (1)$$

где:  $A_{ок}$  – доля агломерата (0-100), располагающегося под окатышами и добавочными материалами в шихтовом бункере БЗУ;

$N_{об}$  – порядковый номер оборота лотка в строке матрицы загрузки (в интервале 1-3).

- Для условий двускипового режима заполнения бункера БЗУ,  $R^2 = 0,60$ ,

$$P_{Mn}^{2 \text{ скипа}} = 190,6 - 47,8N_{об} - 2,5A_{ок} + 1,2N_{об}A_{ок} + 4,6N_{об}^2 - 0,11N_{об}^2A_{ок} \quad (2)$$

Уравнения, полученные в результате физического и математического моделирования, позволили оценить в исследуемые периоды распределение

кремниймарганцевой руды по станциям углового положения лотка на доменных печах №№ 6 и 10 (табл. 2).

Таблица 2 – Распределение кремниймарганцевой руды по станциям углового положения лотка на доменных печах №№ 6 и 10 ПАО «ММК»

Вариант размещения руды	Доля кремниймарганцевой руды (%), поступающей со станций углового положения лотка										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
периферия		22	47	31							
рудный гребень					22	47	31				
					50	50					
осевая зона							50	50			
в среде агломерата		11	24	16	7	19	18	5			

В печь № 6, работавшей на коксе с горячей прочностью по CSR более 40 %, кремниймарганцевую руду загружали в смеси с железорудным сырьем со станций угловых положений лотка №№ 10-4 матрицы загрузки, тем самым обеспечивая ее поступление в различные зоны по радиусу колошника. В результате, изменение режима загрузки кремниймарганцевой руды с размещения ее в слое агломерата на локальное поступление в зону рудного гребня, сопровождалось улучшением условий фильтрации чугуна и шлака через слой кокса в горне печи, что оказывало положительное влияние на удельный расход кокса (понижение на 0,26 %) и производительность (повышение 0,9 %).

Смена режима загрузки руды в направлении периферийной части печи при росте CSR кокса от 39,1 до 41,3 % приводила к снижению дренажа углеродистой насадки в горне и ухудшению технико-экономических показателей плавки.

При работе печей №№ 6 и 10 ПАО «ММК» на коксе с CSR менее 40 % для различных условий ее изменения: увеличение, уменьшение и константа, исследовали различные периоды:

- без использования кремниймарганцевой руды;
- с загрузкой ее в зоны по радиусу колошника с максимальной и минимальной рудными нагрузками;
- размещением руды в периферийной зоне.

В условиях увеличения горячей прочности кокса от 37,9 до 38,8 % (пара периодов 3) перемещали кремниймарганцевую руду в зону рудного гребня из периферийной части печи. Показатели дренажной способности кокса в горне (табл. 3) указывают на улучшение дренажа жидких продуктов плавки через углеродистую насадку в зоне рудного гребня и ухудшение в периферийной части печи. Преимущественная роль движения жидких продуктов плавки через углеродистую насадку в локальной по радиусу печи зоне рудного гребня обеспечила экономичность процесса производства чугуна за счет роста производства на 1,6 % при понижении удельных затрат кокса на процесс.

Таблица 3 – Некоторые технологические показатели работы доменных печей № 6 и 10

Наименование показателей	Периоды работы доменных печей для различных условий по горячей прочности кокса (CSR), %															
	Более 40				Менее 40, по вариантам изменения CSR кокса в опытном периоде по отношению к базовому:											
					возрастает								убывает			
Номер доменной печи	6												10		6	
Номер пары исследуемых периодов	1		2		3		4		5		6		7		8	
Горячая прочность кокса, (CSR), %	53,7	53,7	39,1	41,3	37,9	38,8	36,3	33,4	33,9	29,1	35,7	33,9	35,0	32,6	35,3	35,3
Реакционная способность, (CRI), %	29,0	29,0	39,6	38,9	39,4	39,4	39,3	40,4	39,9	42,1	39,5	39,9	41,8	43,9	39,1	39,0
Станции углового положения лотка матрицы, с которых загружали кремниймарганцевую руду	10-4	7-5	7-5	10-8	10-8	7-5	7-5	10-8	5-4	7-6	-	5-4	-	7-4	7-5	-
Расход, кг/т чугуна: сырьевых материалов в том числе кремниймарганцевой руды	1709	1707	1681	1677	1687	1690	1704	1701	1725	1723	1684	1725	1667	1688	1711	1686
Содержание марганца в чугуне, %	0,58	0,54	0,40	0,42	0,51	0,48	0,51	0,55	0,58	0,56	0,25	0,58	0,28	0,50	0,55	0,28
Содержание MnO в шлаке, %	0,48	0,47	0,37	0,45	0,46	0,41	0,47	0,44	0,47	0,43	0,29	0,47	0,25	0,40	0,44	0,26
Коэффициент сопротивления шихты в нижней части печи	15,70	15,78	14,46	13,87	13,51	13,87	13,24	13,64	13,93	13,89	13,73	13,93	6,82	7,12	14,28	14,36
Расчетная вязкость шлака, Па·с	0,50	0,47	0,51	0,58	0,60	0,57	0,57	0,57	0,54	0,53	0,42	0,54	0,63	0,65	0,52	0,50
Количество шлака, остающегося в горне после выпуска, тонны	23,4	19,5	16,6	21,3	21,0	17,8	18,2	21,8	19,8	17,0	20,0	19,8	31,9	27,6	19,4	19,1
Степень приближения фактического содержания углерода в чугуне к равновесной величине, %	94,8	93,4	94,6	93,8	94,7	95,4	95,2	95,1	95,2	95,6	95,5	95,2	98,2	98,1	95,2	95,6
Индекс DMI	198	224	202	215	201	188	191	195	189	184	192	189	132	135	191	183
Удельный расход кокса, сухого скипового, кг/т чугуна	419,0	411,7	426,0	432,9	431,2	431,0	443,7	436,4	436,5	442,3	425,6	424,7	420,1	409,4	436,7	431,0
Производительность печи, т/сутки	3323	3353	3481	3439	3349	3401	3351	3391	3407	3412	3227	3338	5313	5359	3415	3419

На доменных печах № 6 (группа периодов 4 и 6) и № 10 (номер пары периодов 7) при снижении горячей прочности кокса) реализовали улучшение показателей их работы загрузкой руды в объёмы с пониженной рудной нагрузкой – периферию и осевую зону колошника. В среднем для двух печей улучшились показатели дренажной способности, что обеспечило рост производительности на 2,3 % отн. при уменьшении на 0,95 % отн. удельного расхода кокса.

В условиях уменьшения горячей прочности кокса с 33,9 до 29,1 % при загрузке кремниймарганцевой руды в зону с повышенной рудной нагрузкой произошло повышение от 436,5 до 442,3 кг/т чугуна удельного расхода кокса (группа периодов 5). Это является результатом осложнений процесса дренажа жидких продуктов через слой кокса в осевой и периферийной зонах печи.

При сохранении величины горячей прочности кокса на уровне 35,3 % и эффективной промывке зоны рудного гребня (группа периодов 8) повышение технико-экономических показателей работы доменной печи № 6 обеспечивалось завершением промывочного режима (табл. 3.).

Таким образом, разработали и внедрили технологию загрузки кремниймарганцевой руды, обеспечивающей рациональную промывку локальных зон горна с наихудшей дренажной способностью коксовой насадки, применительно к доменным печам ПАО «ММК», оснащённым лотковым ЗУ. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Загрузка материалов, обеспечивающая рациональную промывку локальных зон горна с наихудшей дренажной способностью коксовой насадки

CSR кокса, %	Зона размещения кремниймарганцевой руды в колошниковом пространстве печи
> 40	с повышенной рудной нагрузкой
< 40, варианты в зависимости от изменения ее величины, % абс.: - уменьшение более чем на 0,5; - увеличение более чем на 0,5; - в интервале $\pm 0,5$	с пониженной рудной нагрузкой с повышенной рудной нагрузкой в среду агломерата

Эффективное использование кремниймарганцевой руды на доменных печах № 6 и 10 ПАО «ММК» позволило повысить производительность печей в среднем на 0,48 % и снизить удельный расход кокса в среднем на 0,43 % на каждые 10 кг/т чугуна кремниймарганцевой руды в интервале 21,4-40,6 кг/т чугуна.

Загрузка кремниймарганцевой руды в зоны горна, не препятствующие движению продуктов плавки к лёткам, сопровождалась увеличением удельного расхода кокса на 0,53 % и уменьшением производительности на 0,24 % на каждые 10 кг/т чугуна кремниймарганцевой руды в интервале 21,4-40,6 кг/т чугуна.

**В четвертой главе** изложены результаты расчетов и физического моделирования процессов, развивающихся при превращении кремниймарганцевой руды в ферросиликомарганец:

- лабораторных исследований получения предварительно восстановленной водородом кремниймарганцевой руды и ферросиликомарганца из сырья Ниязгуловского месторождения;

- выполненных расчетов по получению ферросиликомарганца с применением руды Ниязгуловского месторождения в различных вариантах.

Согласно проведенному рентгенофазовому исследованию (рисунок 4), марганец предварительно восстановленной при 900 °С кремниймарганцевой руды находится в основном в фазе оксида марганца MnO с примесью силиката марганца Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, а железо – в фазе FeO с примесями твердых растворов с оксидом магния. Значимых количеств оксидов Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также фазы металлического железа на рентгенограмме не выявлено.

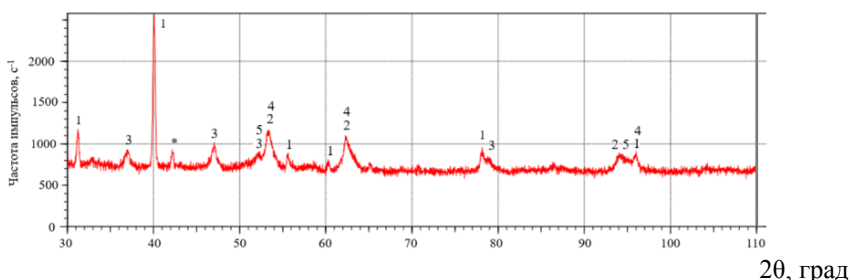


Рисунок 4 – Дифрактограмма кремниймарганцевой руды, восстановленной водородом при температуре 900 °С, с обозначением основных фаз:

1 – SiO<sub>2</sub>, 2 – MnO, 3 – Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, 4 – FeO; 5 – Mn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

\*) – *рефлекс материала подложки для запрессовки пробы (борная кислота)*

Экспериментальные абсолютные степени восстановления марганца и железа водородом при температуре 1100 °С соответственно составили 33,3 и 65,6 % (табл. 5). Оксид марганца восстановился до MnO в составе марганецсодержащих фаз оксида марганца (II) MnO (рис. 5), силиката марганца Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, а также смешанных силикатов марганца-железа (Fe,Mn)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> и марганца-алюминия Mn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.

Таблица 5 – Содержание железа, марганца и их оксидов в восстановленной руде при температуре 1100 °С

Массовая доля компонента, %					Абсолютная степень восстановления, %	
Mn <sub>общ</sub>	MnO	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	R <sub>f</sub> (Fe)	R <sub>f</sub> (Mn)
20,0	25,83	14,05	6,8	9,32	33,3	65,6

Согласно расчету использование в процессе жидкофазного восстановления кремниймарганцевой руды, предварительно восстановленной в среде водорода

при температуре 1100 °С, позволит сэкономить 160,6 кг кокса на 1 тонну восстанавливаемой коксом руды.

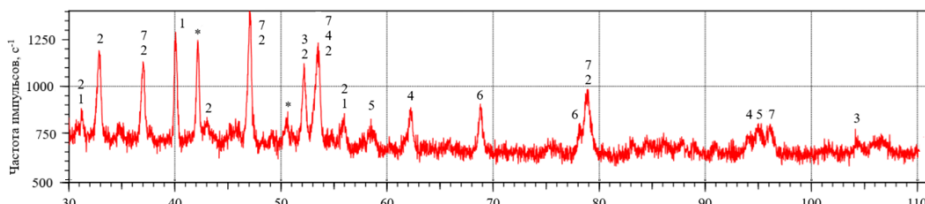


Рисунок 5 – Дифрактограмма кремниймарганцевой руды, восстановленной водородом при температуре 1100 °С, с обозначением основных фаз:

1 –  $\text{SiO}_2$ , 2 –  $\text{Mn}_2\text{SiO}_4$ ; 3 –  $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ; 4 –  $\text{MnO}$ ; 5 –  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ; 6 –  $\text{Fe}$ ; 7 –  $(\text{Fe},\text{Mn})_2\text{SiO}_4$

Расчетами установлены интервалы соотношения кремниймарганцевой руды и богатого марганцевого концентрата месторождений страны Габон или богатой марганцевой руды Парнокского месторождения (табл. 6.), обеспечивающих получение марочного ферросиликомарганца (рис. 3).

Таблица 6 – Химический состав Парнокского и Габонского концентратов

Вид используемых концентратов	Содержание элементов и оксидов, %				
	Mn	Fe	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO
Габонский	41,5	10,36	7,4	7,7	0,17
Парнокский	45,6	3,48	12,5	3,1	15,1

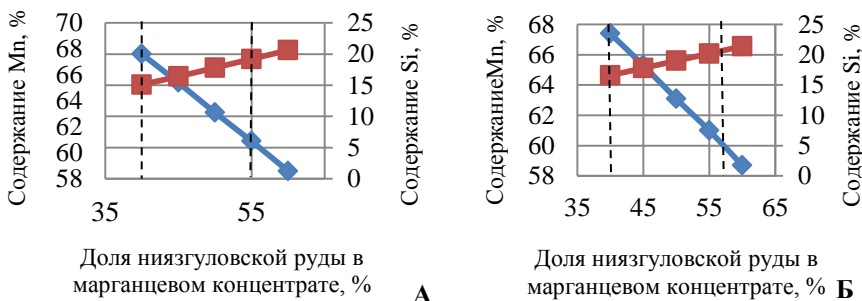


Рисунок 3 – Содержание марганца ( —◆— ) и кремния ( —■— ) в ферросиликомарганце для исходной шихты при различных соотношениях марганцевой руды месторождения Ниязгулово и Габонского концентрата (А); Ниязгулово и Парнокского концентрата (Б)

Для обеспечения содержания марганца и кремния в ферросиликомарганце  $\text{FeMnSi18}$  по ГОСТ 4756-91 необходимо обеспечивать долю кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в интервале от 40 до 55 и 57 %

соответственно при использовании в составе шихты концентрата месторождений Габона и руды Парнокского месторождения.

На этапе физического моделирования выплавляли два варианта ферросиликомарганца: соответствующий и несоответствующий ГОСТ 4756-91. Ферросиликомарганец, несоответствующий ГОСТ 4756-91, получали из кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в сыром состоянии и предварительно восстановленном в среде водорода. Химический состав полученных сплавов представлен в табл. 7.

Таблица 7 – Химический состав ферросиликомарганца и степень извлечения элементов из рудного сырья при восстановлении смеси руд и концентратов

Смесь руды Ниязгуловского месторождения и габонского концентрата в соотношениях	Содержание элементов в металле, %				Степень извлечения элементов в металл, %			
	фактическое		с учетом поправочного коэффициента		фактическое		с учетом поправочного коэффициента	
	Mn	Si	Mn	Si	Mn	Si	Mn	Si
100/0								
- сырая руда	36,7	17,4	41,8	22,6	27,5	10,4	31,3	13,5
- после твердофазного восстановления	39,4	15,8	44,9	20,5	32,7	6,3	37,3	8,2
60/40	46,7	16,9	53,2	22,0	40,2	24,4	45,8	31,7
50/50	53,2	15,2	60,6	19,8	44,5	22,0	50,7	28,6
40/60	53,5	13,2	61,0	17,2	47,9	21,3	54,6	27,7
30/70	59,3	12,2	67,6	15,9	48,2	20,7	54,9	26,9

Содержание марганца в металле увеличивалось от 46,7 до 59,3 % в условиях роста степени извлечения его от 40,22 до 48,15 % при уменьшении доли кусковой руды Ниязгуловского месторождения в составе шихты от 60 до 30 %. Содержание кремния в металле при этом снижалось от 16,9 до 12,2 %, что является результатом уменьшения в составе шихты доли кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения, богатой по содержанию  $\text{SiO}_2$ .

### Заключение

1. Разработаны научно обоснованные технологические решения комплексного использования бедных кремниймарганцевых руд, обеспечивающее вовлечение в процесс переработки всех разновидностей их составляющих по крупности. Использование класса более 20 мм кремниймарганцевого материала достигается промывка горна доменных печей и, одновременно, обеспечивая получение чугуна с содержанием марганца 0,4-0,6 % и более, снижение расхода ферромарганца в дальнейшем сталеплавильном переделе. Класс крупности менее 20 мм позволяет получать зеркальный чугун или ферросиликомарганец, соответствующий ТУ, и ферросиликомарганец, соответствующий ГОСТ 4756-91.

2. Изучен химический и фазовый состав кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения. В исходной руде марганец в основном находился в



форме браунита ( $Mn^{+2}Mn^{+3}_6SiO_{12}$ ) с подчиненными количествами родохрозита  $MnCO_3$  и пьомонтита  $Ca_2MnAl_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ , а железо – в виде гематита  $Fe_2O_3$ . Вмещающая порода была представлена в основном кварцем  $SiO_2$ .

3. Для адаптации лабораторных экспериментов к промышленным условиям проведено в индукционной печи ИСТ-0,06 жидкофазное восстановление шихты, используемой на промышленном предприятии, которая включала 72 % габонского концентрата, 26 % кварцита и 2 % доломита. В результате получили поправочные коэффициенты, равные 1,14 для марганца и 1,3 для кремния, основанные на разности химического состава ферросплава полученного в промышленных и лабораторных условиях.

4. Физическим и математическим моделированием получены количественные зависимости поступления кремниймарганцевой руды в смеси с железорудным сырьем из бункера БЗУ в колошниковое пространство. Действующие факторы: место размещения руды в бункере, номер порядковой станции лотка в строке матрицы, односкиповый и двухскиповый режимы загрузки. Станциям углового положения лотка матрицы загрузки №№ 10-8 и 7-5 соответствовало содержание руды Ниязгуловского месторождения по кольцевым зонам колошника в интервале 22-47 % от общего ее расхода.

5. На доменных печах №№ 6 и 10 ПАО «ММК» промышленными испытаниями выявлены рациональные режимы загрузки кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения, обеспечивающие эффективную промывку горна печи от спели и мелочи кокса в зависимости от горячей прочности кокса по CSR:

- в зону с повышенной рудной нагрузкой, если горячая прочность кокса более 40 %;

- в различные зоны, если горячая прочность кокса менее 40 %:

а) в зону с пониженной рудной нагрузкой при уменьшении более чем на 0,5 %, абс.;

б) в зону с повышенной рудной нагрузкой при увеличении более чем на 0,5 %, абс.;

в) в среду агломерата при варьировании горячей прочности кокса в интервале  $\pm 0,5$  %, абс.

6. Эффективное проведение промывки использованием руды в интервале 21,4-40,6 кг/т чугуна на доменных печах № 6 и 10 ПАО «ММК» позволило повысить производительность в среднем на 0,48 % и снизить удельный расход кокса в среднем на 0,43 % на каждые 10 кг/т чугуна кремниймарганцевой руды.

7. В лабораторной печи фирмы LECO исследовали предварительное твердофазное восстановление кремниймарганцевой руды при температуре 1100 °С в среде водорода до прекращения убыли массы. Экспериментальные абсолютные степени восстановления марганца и железа водородом соответственно составили 33,3 и 65,6 %. Оксид марганца ( $Mn_2O_3$ ) браунита восстановился до  $MnO$  в составе марганецсодержащих фаз оксида марганца (II)  $MnO$ , силиката марганца  $Mn_2SiO_4$ , а также смешанных силикатов марганца-железа  $(Fe,Mn)_2SiO_4$  и марганца-алюминия  $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ .

8. Исследовано жидкофазное восстановление кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения в исходном состоянии и после предварительного твёрдофазного восстановления водородом. Адаптация лабораторных экспериментов к промышленным условиям с использованием поправочного коэффициента показывает возможность получения ферросплава в промышленных условиях с содержанием марганца и кремния 41,8 и 22,6 %, 44,9 и 20,5 % соответственно при использовании в шихте сырой и предварительно восстановленной руды.

9. Проведение лабораторных экспериментов с пересчетом результатов с использованием поправочного коэффициента применительно к промышленным условиям показало возможность производства ферросиликомарганца, соответствующего ГОСТ 4756-91 из шихты, включающей от 30 до 50 % кремниймарганцевой руды Ниязгуловского месторождения.

### **Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

#### **В рекомендованных ВАК РФ изданиях:**

1. Результаты физического моделирования загрузки лотковым устройством марганцевой руды в качестве добавки к железорудному сырью доменной плавки / А. С. Харченко, Л. А. Закуцкая, М. В. Потапова, С. К. Сибатуллин // Черные металлы. – 2023. – № 5. – С. 4-7.

2. Изучение поведения марганца и кремния при получении силикомарганца из бедных марганцевых руд / А. С. Харченко, М. В. Потапова, Л. А. Закуцкая [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2023. – № 2(45). – С. 13-18.

3. Определение рациональной доли бедных марганцевых руд в исходной шихте при получении ферросиликомарганца / В. А. Бигеев, А. С. Харченко, М. В. Потапова, Л. А. Закуцкая [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 4(43). – С. 4-8.

4. Изучение возможности вовлечения в металлургическое производство марганецсодержащего сырья Южного Урала / Н. В. Панишев, А. С. Харченко, В. А. Бигеев, ... Л. А. Закуцкая // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 7(230). – С. 31-37.

#### **В других изданиях:**

1. Частичное импортозамещение богатого марганцевого концентрата бедной кремниймарганцевой рудой при получении ферросиликомарганца / Л. А. Закуцкая, А. С. Харченко, М. В. Потапова [и др.] // Современные проблемы электрометаллургии стали : материалы XIX Всероссийской конференции с международным участием, Челябинск, 10–12 сентября 2024 года. – Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2024. – С. 140-146.

2. Закуцкая Л.А. Жидкофазное карботермическое восстановление бедных марганцевых руд в лабораторных условиях / Л. А. Закуцкая, А. С. Харченко, М. В. Потапова [и др.]// Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции,

Магнитогорск, 22-26 апреля 2024 года. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2024. – С. 131.

3. К вопросу о получении марганецсодержащих сплавов из бедных марганцевых руд южно-уральского региона / А. С. Харченко, М.В. Потапова, Л.А. Закуцкая [и др.] // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований : Труды VI Конгресса с международным участием « ТЕХНОГЕН-2023», Екатеринбург, 11-14 июля 2023 года. – Екатеринбург. 2023. – С.317-319.

4. Закуцкая, Л. А. Твердофазное частичное восстановление бедных марганцевых руд в среде водорода / Л. А. Закуцкая, А. С. Харченко, М. В. Потапова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 112.

5. Закуцкая, Л. А. Определение рационального состава шихты для выплавки марочного силикомарганца с применением бедных марганцевых руд / Л. А. Закуцкая, А. С. Харченко, М. В. Потапова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 19-21.

6. Изучение поведения марганца в процессе полного жидкофазного карботермического восстановления низзуловской руды / Л. А. Закуцкая, А. С. Харченко, В. А. Бигеев, М. В. Потапова // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2022. – № 21. – С. 116-120.

7. Определение основных параметров выплавки ферросиликомарганца из бедных марганцевых руд / В. А. Бигеев, Л. А. Закуцкая, М. В. Потапова [и др.] // Физико-химические основы металлургических процессов (ФХОМП 2022) : сборник трудов международной научной конференции имени академика А.М. Самарина, посвященной 120-летию со дня рождения выдающегося ученого-металлурга, академика АН СССР Самарина А.М., 265-летию со дня основания Выксунского металлургического завода и 20-летию Выксунского филиала НИТУ «МИСиС», Выкса, 10–14 октября 2022 года. – Выкса: АО "Выксунский металлургический завод", 2022. – С. 356-359.

8. Панишев, Н. В. Изучение возможности вовлечения в металлургическое производство марганецсодержащего сырья Республики Башкортостан / Н. В. Панишев, Л. А. Закуцкая // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 87.

9. Панишев, Н. В. Развитие бескоксовой металлургии железа / Н. В. Панишев, Л. А. Закуцкая // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 87.