

На правах рукописи



Адиллов Галымжан

**РАЗРАБОТКА ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ВОСТРЕБОВАННЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 2.6.2.

Металлургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре пирометаллургических и литейных технологий.

Научный руководитель:

Рощин Василий Ефимович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИЛ «Водородные технологии в металлургии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Официальные оппоненты:

Михеенков Михаил Аркадьевич

доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБУН Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УрО РАН), г. Екатеринбург

Метёлкин Анатолий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, главный специалист научно-исследовательского центра АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», г. Нижний Тагил

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

Защита состоится 18 сентября 2024 г. в 16:00 в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ), Ученый совет. Тел. (351) 267-91-61, e-mail: adilovg@susu.ru, roshchinve@susu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/adilov-galymzhan>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Шабурова Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в отвалах медеплавильных предприятий России находится более 110 млн. тонн шлака. Так, только в окрестностях г. Карабаш Челябинской области хранится около 30 млн. т отвальных промышленных отходов, в которых содержится порядка 40 масс.% или около 10 млн. т железа. Хранение таких отходов не только требует огромных площадей, но и неблагоприятным образом сказывается на экологии. Кроме того, на содержание отвалов и экологические налоги расходуются значительные средства, что определяет актуальность их рационального использования.

Помимо железа и меди шлаки содержат также серу, цинк, селен, мышьяк и некоторые другие элементы. С учётом количества самую высокую стоимость в шлаке имеет железо. Вторым по стоимости компонентом медеплавильных шлаков является цинк. Растущие потребности промышленности России в цинке не обеспечены достаточным количеством сырья. В то же время в медеплавильных шлаках содержится порядка 2,5 % цинка.

В настоящее время не существует рациональных методов утилизации медеплавильных шлаков. Шлак в ограниченных объёмах используют при получении строительных материалов. Однако использование шлака в строительной промышленности приводит не только к безвозвратной потере ценных компонентов, но и затруднено в связи с наличием в нём оксидов тяжелых металлов, так как это приводит, в частности, к расслоению бетона. Некоторое количество медьсодержащих отходов может быть добавлено в агломерат для доменной печи. Однако в черной металлургии тяжёлые цветные металлы, в том числе медь, являются вредными примесями, которые снижают механические свойства стали машиностроительного сортамента. Поэтому медьсодержащие отходы на металлургических заводах использовать нежелательно.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени накоплен значительный объём информации, связанной с гидрOMETаллургическими методами переработки медеплавильных шлаков, включающими флотацию и выщелачивание. Однако, эти методы направлены на извлечения драгоценных и цветных элементов, находящихся в медеплавильных шлаках, и не решают комплексного подхода утилизации шлаков. При этом научные и технологические аспекты твердофазного восстановления металлов из медеплавильного шлака с последующим разделением продуктов восстановления и получением востребованных конечных продуктов в комплексе ранее не рассматривались.

Целью работы является научное обоснование и разработка рациональной технологии полной переработки медеплавильных шлаков с получением востребованных металлических и оксидных изделий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить состав и морфологию отвального медеплавильного шлака.
2. Определить термодинамические условия восстановления металлосодержащей части медеплавильных шлаков, обеспечивающие формирование железа в виде металлической фазы и переход цинка в газовую фазу.
3. На основе результатов термодинамического моделирования экспериментально осуществить твердофазное восстановление железа и возгонки цинка с последующим пирометаллургическим разделением твёрдых продуктов восстановления.

4. Определить актуальное направление использования металлосодержащей части медеплавильных шлаков с получением готовой продукции, соответствующей стандартным требованиям.

5. Определить актуальное направление использования шлаковой части медеплавильных шлаков с получением готовой продукции, соответствующей стандартным требованиям к этой продукции.

6. Выполнить технико-экономическое обоснование возможности использования предварительного восстановления с разработкой технологических рекомендаций переработки медеплавильных шлаков.

Научная новизна:

1. Термодинамическим расчетом определены условия селективного твердофазного восстановления железа в компонентах медеплавильного шлака. В кристаллической решетке магнетита железо восстанавливается твердым углеродом при температуре выше 600 °С, а в фалялите – при температуре выше 900 °С.

2. В результате термодинамического моделирования определён химический состав металла, обеспечивающий высокую твердость при сравнительно высокой износостойкости мелющих тел из получаемого металлосодержащей части медеплавильного шлака. Металл должен содержать меди около 1%, кремния около 3,5% при содержании углерода около 3,5%.

3. Установлено влияние концентрации неизбежно присутствующих в металле из медеплавильного шлака примесей (C, Cu, Si, S) на эксплуатационные характеристики мелющих тел: углерод является основным структурооб-разующим элементом, кремний повышает содержание феррита в перлите, сера увеличивает содержание ледебуритной эвтектики в сером чугуне, медь повышает содержание аустенита.

4. Впервые определен температурный режим термообработки, обеспечивающий полную кристаллицию и высокие показатели прочности пропантов, полученных из вторично образованных медеплавильных шлаков с добавлением MgO. Для обеспечения полной кристаллизации пропантов следует провести высокотемпературный нагрев при температуре 800 °С и выдержкой 1 час.

Практическая значимость:

1. Экспериментально подтверждена возможность твердофазного восстановления железа и цинка твердым углеродом в легкоплавком медеплавильном шлаке.

2. Подверждена возможность жидкофазного разделения плавлением продуктов металлизации медеплавильного шлака с получением в зависимости от условий разделения металла в виде чугуна, стали или сплава с повышенным содержанием кремния, пригодных для производства востребованной металлопродукции, и шлака, пригодного для производства пропантов – качественного керамического продукта для нефтяной промышленности.

3. Разработан состав чугуна, содержащего серу и медь и пригодного к использованию в измельчающих машинах в качестве помолоченного инструмента.

4. Разработан состав и технология получения пропантов – расклинивающего агента, пригодного к использованию в нефтяной промышленности для гидроразрыва пласта.

5. Предложена технологическая схема и набор технологического оборудования, включающий трубчатую печь для предварительного восстановления железа и возгонки цинка, дуговую печь для разделения продуктов металлизации, обеспечивающие безотходную ресурсосберегающую пирометаллургическую технологию утилизации медеплавильных шлаков.

Теоретическая значимость. Определены условия селективного твердофазного восстановления железа в кристаллической решетке магнетита и фаялита, содержащихся в медеплавильном шлаке. Определён химический состав металла из металлосодержащей части медеплавильного шлака., обеспечивающий высокую твердость при относительно высокой износостойкости мелющих тел. Разработан чугунный мелющий продукт, содержащий серу и медь, пригодный к использованию в измельчающих машинах в качестве помолоченного продукта. Разработаны состав и технология получения пропантов – расклинивающего агента, пригодного к использованию в нефтяной промышленности для гидроразрыва пласта. Предложена технологическая схема и набор технологического оборудования для безотходной ресурсосберегающей пирометаллургической технологии утилизации медеплавильных шлаков.

Положения , выносимые на защиту:

- Результаты термодинамического моделирования восстановления железа и цинка из медеплавильного шлака углеродосодержащим материалом.
- Результаты экспериментальных исследований процессов восстановительного обжига медеплавильных шлаков.
- Результаты разработки составов чугуна и оксидных композиции для мелющих шаров и пропантов согласно требованиям стандартов к этим изделиям.
- Технологическая схема безотходной переработки медеплавильных шлаков с получением мелющих шаров и пропантов.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы следующие методы исследования. Исходные шлаки, полученные образцы мелющих тел и пропантов заливали эпоксидной смолой, выдерживали около 10 минут вакуумной камере (установка Struers citovac для обеспечения вакуума) с целью удаление воздуха в порах и трещинах. Полученные образцы шлифовали в установке Struers tegrapol-15 и (аншлиф) исследовали на оптическом микроскопе в отраженном свете. Микрорентгеноспектральный анализ образцов проводили с помощью электронного микроскопа JSM-6460LV, оборудованного волновым и энергодисперсионным анализаторами; рентгеноструктурный фазовый анализ образцов на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV. Обработку результатов производили с использованием программного обеспечения «Match». Количественную оценку фазового состава производили с помощью приложения Rietveld Refinement.

Степень достоверности результатов. Достоверность термодинамических и теоретических расчетов обеспечена использованием надежных справочных данных и современного программного обеспечения, соответствием сделанных на основе этих расчетов выводов и рекомендаций экспериментальным результатам. Достоверность экспериментальных результатов обусловлена применением современного оборудования при проведении высокотемпературных экспериментов; применением широко распространенных, разнообразных и апробированных методов исследования; высоким качеством и точностью исследовательского оборудования, применяемого при анализе экспериментальных результатов; соответствием полученных результатов данным других исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на международных и всероссийских конференциях: «Инновации в производстве и подготовке технических кадров». Международная научно–практическая конференция. Актобе, 2016 г.; «Молодёжь, наука и инновации». XIV Международная научно–практическая конференция. Актобе, 2018 г.; Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения

недр». XVII Международная научно–практическая конференция проводимая в рамках программы модернизации общественного сознания «ориентация на будущее: духовное возрождение». Актау, 2018 г.; Конгресс «Техноген–2019». Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. Международная конгресс. Екатеринбург, 2019 г.; «Современные проблемы электрометаллургии стали». XVIII Международная конференция. Челябинск, 2019 г.; «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources». The XVI International Forum–Contest of Students and Young Researchers. Санкт Петербург, 2020 г.; «Материаловедение и металлургические технологии Rusmetalcon». Международная научно–практическая конференция. Челябинск, 2020 г.; «Steel start 2020 Акселератор проектов для металлургии». Международный форум. Москва, 2020 г.; «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources». The XVII International Forum–Contest of Students and Young Researchers. Санкт Петербург, 2021 г.; «Материаловедение и металлургические технологии Rusmetalcon». Международная научно–практическая конференция. Челябинск, 2021 г.; «Sustainability through Science & technology SIPS–2022» Dmitriev International Symposium 6th Intl. Symp. on Sustainable Metals & Alloys Processing, Phuket, Thailand, 2022.; «Диалог металлургов: прогноз развития отрасли до 2030 года. Ценовые и технологические решения». Международный форум. Москва, 2022 г.; «XVII Международный Конгресс сталеплавильщиков и производителей металла». Международный конгресс, Магнитогорск, 2023 г.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 работ в материалах всероссийских и международных конференций. Подана заявка на получения патента на изобретение РФ.

Личный вклад автора:

1. Планирование, подготовка и проведение экспериментов. Подготовка и участие в исследовании полученных образцов.
2. Анализ и интерпретация полученных результатов.
3. Подготовка и написание научных статей по теме диссертации, выступление с докладами на конференциях и семинарах.

Связь диссертации с планами НИР. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований №FENU-2023-0011 (2023011ГЗ)) и в рамках научного проекта РФФИ № 20-38-90109.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов. Диссертация изложена на 98 странице, содержит 34 рисунка, 19 таблиц и список литературы из 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень разработанности проблемы, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна, практическая ценность и достоверность результатов исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена общая характеристика медеплавильных шлаков, рассмотрена их классификация и изложены основные проблемы их переработки, а также сформулировано общее технологическое решение переработки медеплавильных шлаков.

Отмечено, что к настоящему времени накоплено огромное количество медеплавильных шлаков, содержащих около 40% железа, 0,5% меди и другие ценные компоненты, что позволяет считать их не только отходами, но и потенциально ценным сырьевым материалом. Основная классификация медеплавильных шлаков основана на используемых агрегатах их происхождения: шахтные, отражательные, автогенные и конвертерные медеплавильные шлаки. Решением утилизации медеплавильных шлаков может быть использование лишь комплексного подхода переработки. Для извлечения меди, кобальта и других цветных металлов следует использовать низкотемпературные процессы, которые относятся к гидрометаллургическим методам. Но главными ценными продуктами в медеплавильных шлаках являются железо и цинк, извлечение которых целесообразно осуществлять пирометаллургическими способами. Для этого можно использовать технологии прямого восстановления железа, восстановления и возгонки цинка в одном агрегате. Полученный после прямого восстановления полупродукт можно разделять на металл и шлак в дуговых электропечах. Из полученного металла, содержащего повышенное количество меди и серы, можно изготавливать такие изделия как мелющие тела, строительная арматура и некоторые другие изделия. Вторичный шлак можно использовать в качестве строительного песка или в виде более дорогих продуктов, в частности, в виде пропантов для нефтедобывающей отрасли.

Вторая глава посвящена исследованию структуры и морфологии исходного медеплавильного шлака. Приведены результаты термодинамического моделирования в программном комплексе «TERRA», основные результаты твердофазного восстановления железа и возгонки цинка, а также результаты пирометаллургического разделения продуктов восстановления.

Объектом данного исследования является медеплавильный шлак Карабашского медеплавильного комбината. Шлак представлен в виде измельченного материала, основная фракция < 0,3 мм. Температура плавления шлака $T_{пл} \approx 1050 \text{ }^\circ\text{C}$.

Фракционный состав шлака показан на рисунке 1, а. Электронномикроскопический анализ образцов проводили на растровом микроскопе Jeol JSM7001F с использованием для определения элементного состава энергодисперсионного детектора Oxford INCA X-max 80. Средний химический состав, определенный после расплавления и закалки шлака для усреднения состава (рис.1,б), приведен в табл. 1. Состав основных фаз по данным микрорентгеноспектрального анализа представлен также в табл.1. Основные фазы шлака: фаялит $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, магнетит Fe_3O_4 и пироксен $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$. Сера связана в сульфиды меди, железа и цинка. Присутствуют также микрокорольки металла на основе меди.

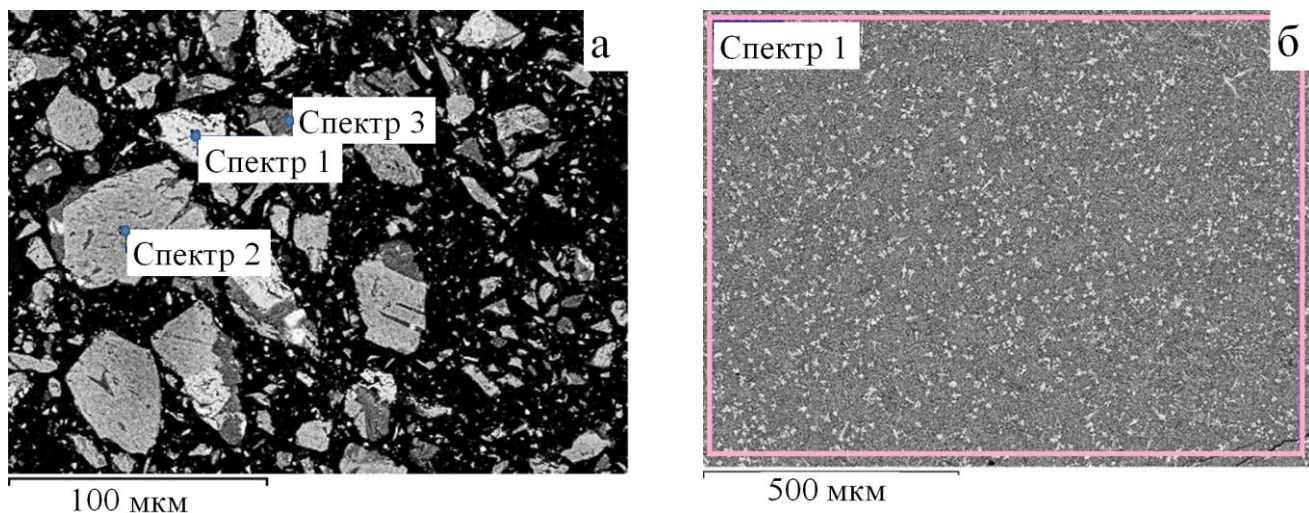


Рисунок 1 – Основные фазы исходного шлака (а) и вид шлака после расплавления и закалки (б).

Таблица 1 – Элементный и минеральный состав исходного шлака

Участок анализа	Содержание элементов, ат. %									Преобладающие фазы в спектрах
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Zn	
Спектр 1 Рис.1а	52,7	0,1	0,0	0,9	6,7	0,1	35,9	1,5	2,1	магнетит (Fe ₃ O ₄)
Спектр 2 Рис.1а	59,0	6,1	0,0	13,7	0,0	0,3	20,2	0,1	0,8	фаялит (2FeO·SiO ₂)
Спектр 3 Рис.1а	62,0	0,3	3,5	19,6	0,3	5,4	7,9	0,1	0,8	пироксен (CaFeSi ₂ O ₆)
Спектр 1 Рис.1б	61,0	1,1	1,6	11,6	0,9	1,4	21,8	0,3	1,1	ат. %
	36,0	0,9	1,6	11,6	1,1	1,9	43,6	0,7	2,5	масс. %

Методика проведения расчетов. Термодинамическое моделирование восстановления компонентов шлака провели с использованием программного комплекса «TERRA». В качестве исходного состава оксидного материала при термодинамическом расчете приняли состав отвального шлака Карабашского медеплавильного комбината, основными железосодержащими минеральными фазами которого являются магнетит FeO·Fe₂O₃, фаялит 2FeO·SiO₂ и пироксен CaO·FeO·2SiO₂. В качестве восстановителя использовали углерод. Количество углерода в системе задавали исходя из стехиометрии реакций восстановления железа.

Состав оксидного раствора описывали в рамках модели ассоциированного раствора. В качестве составляющих раствора оксидной фазы принимали как индивидуальные оксиды (SiO₂, Al₂O₃, Fe₃O₄, MnO, MgO, CaO), так и ассоциаты (Fe₂SiO₄, Mg₂SiO₄, CaSiO₃, 2FeO·SiO₂ и CaO·FeO·2SiO₂). Сера в шлаке может присутствовать в виде сульфидов CaS и MnS, которые также были включены в состав исходной оксидной фазы. Для металлической фазы приняли следующие основные составляющие: Fe, C, Si, FeS, Fe₃C. В качестве постоянного параметра системы приняли общее давление 0,1 МПа (1 атм.). Для выполнения расчетов в базу данных термохимических констант веществ программы TERRA были введены недостающие данные для фаялита. В расчете использованы данные: $\Delta_f H_{298}^0 = -118,432$ кДж; $S_{29}^0 = 349,23$ Дж/моль·К; уравнение теплоемкости $C_p = 176,0 - 8,808 \cdot 10^{-3} - 2,471 T^2 \cdot 10^{-5} - 3,889 T^{-2} \cdot 10^{-5}$ в интервале температуры 298 – 1450 °С. Расчет провели с шагом 50 °С до температуры 1750 °С.

После ввода исходного состава и двух термодинамических параметров состояния равновесия (давление и температура) программа из имеющихся в исходном состоянии химических элементов комбинирует все возможные простые и сложные вещества, о которых есть сведения в базе данных. Далее программа методом итерационных расчётов определяет вещества и их количество, сумма энтропии которых при заданных термодинамических параметрах обеспечивает максимальное значение энтропии системы. Особенностью этой методики моделирования является то, что она не оперирует уравнениями химических реакций. При моделировании исходный состав задаётся точно, а какой продукт получится и сколько – заранее предсказать нельзя.

Результаты термодинамического моделирования. При расходе углерода в количестве, соответствующем стехиометрии реакций восстановления железа, в системе в интервале температуры 600...1300 °С существуют элементы и соединения C, CO, CO₂, Al₂O₃, Zn, ZnO, ZnS, FeS, Cu, Cu₂S, Fe, MgSiO₃, CaS, CaSiO₃, SiO₂. (рисунк 2, а и б).

Возможность появления цинка в газовой фазе системы наблюдается в двух температурных интервалах. В первом температурном интервале (750...810 °С) цинк

появляется за счёт восстановления его углеродом из оксида цинка. Во втором температурном интервале (1020...1100°C) количество цинка в газовой фазе повышается при уменьшении концентрации сульфида цинка и повышении концентрации сульфида железа и сульфида меди (рис. 2, б). Это свидетельствует о том, что в этом температурном интервале сульфиды железа и меди являются более устойчивыми по сравнению с сульфидом цинка. Повышение температуры до 1230 °С приводит к появлению в системе более устойчивого при высокой температуре сульфида кальция при одновременном уменьшении количества сульфида железа и, соответственно, увеличением количества металлического железа.

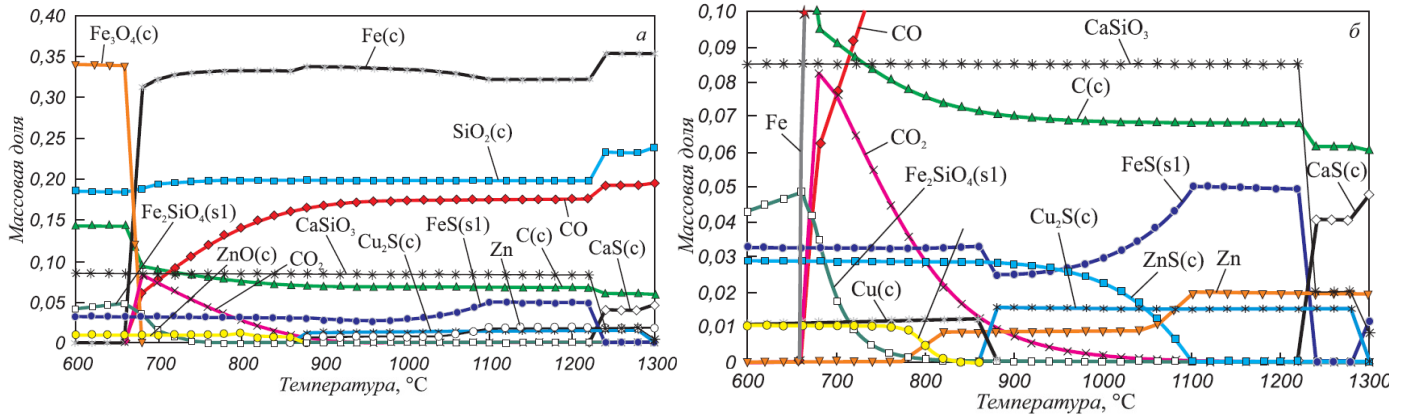


Рисунок 2 – Результаты термодинамического расчета при количестве углерода в системе согласно стехиометрии реакций восстановления железа (а и б).

При повышенном относительно стехиометрии реакций восстановления железа содержании углерода и повышении температуры выше 1600°C в системе происходит восстановление кремния и образование металлического кремния (рисунок 3). Так как при этом в конденсированном состоянии в системе присутствуют железо, углерод и кремний, то это должно вести к образованию сплава железо–углерод–кремний.

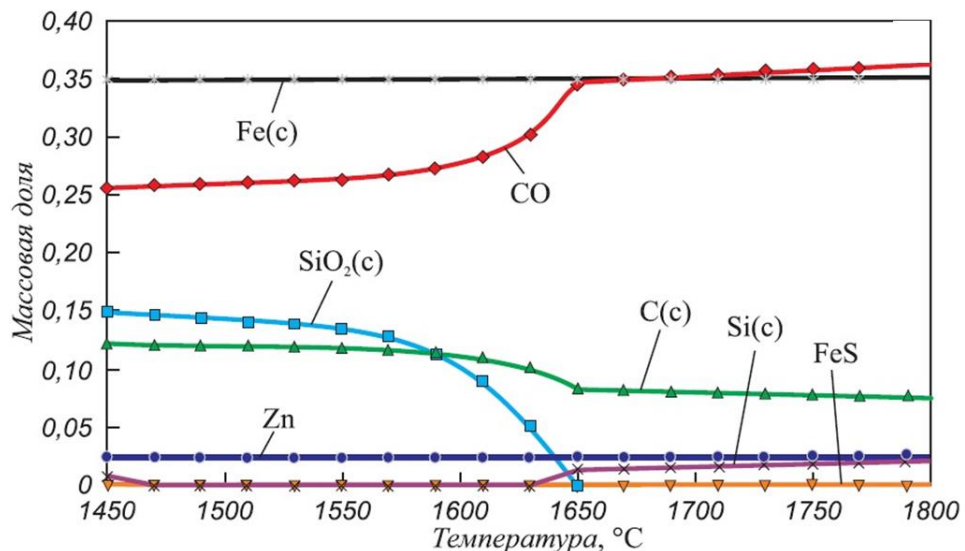


Рисунок 3 – Результаты термодинамического расчета при количестве углерода в два раза превышающем стехиометрию реакций восстановления железа в системе.

Методика проведения экспериментов. Основываясь на полученных результатах термодинамического расчета, в лабораторных условиях проведены эксперименты по вельцеванию цинка (восстановлению цинка в твёрдой фазе и улавливанию в виде оксида окислившегося в газовой фазе цинка) и твердофазному восстановле-

нию железа с последующим пирометаллургическим разделением продуктов восстановления и получением стали, чугуна или сплава с повышенным содержанием кремния.

Эксперименты по вельцеванию цинка проводили в лабораторной дуговой электропечи, в качестве осадителя оксида цинка использовали графитовый электрод. Температура ванны измерялась по завершению экспериментов, и составляла 1600°C. В качестве шихты в этом эксперименте использовали окатыши на основе медеплавильного шлака с добавками угля и связующего. В результате получали цинк, осажденный на электроде, сплав железа с углеродом и шлак в ванне печи. Эксперименты по твердофазному восстановлению железа проводили в герметизированной печи сопротивления (печи Таммана) в интервале температур 980–1020 °С и выдержке от 1 до 2 часов. В качестве шихты использовали механическую смесь медеплавильного шлака и угля. После твердофазного восстановления железа в медеплавильных шлаках были проведены эксперименты по пирометаллургическому разделению продуктов восстановления. Для разделения продукты твердофазного восстановления плавил в печи сопротивления с использованием корундового тигля или в индукционной печи с графитовым тиглем.

Результаты извлечения цинка и улавливания оксида цинка. Температура при восстановлении цинка в ванне дуговой печи вследствие влияния дуги измерялась лишь перед сливом и составляла примерно 1600°C. В результате плавления получали три продукта:

- шлак, аналогичный получаемому индукционной плавкой продуктов твёрдофазного восстановления;
- оксид цинка, осаждённый на электроде (рисунок 4);
- слиток металла.

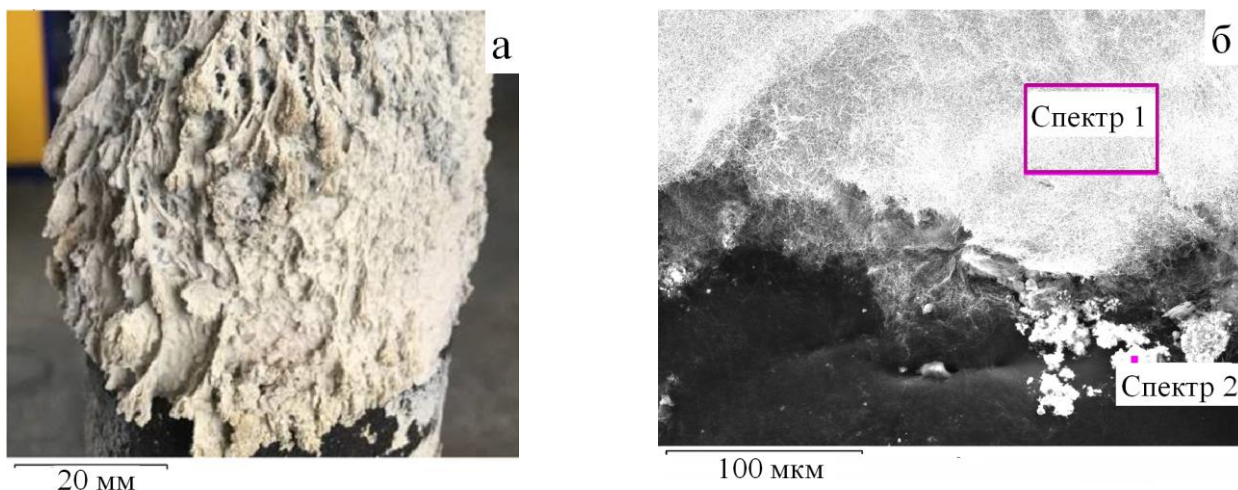


Рисунок 4 – Вид конденсата оксида цинка на электроде (а) и при электронной микроскопии (б).

Оксид цинка осаждался на электроде в виде сыпучего порошка грязно-белого цвета, который рукой размазывается подобно гелю. По химическому составу конденсат состоит в основном из оксида цинка, однако содержит также серу, соединения железа и кремния, (ат.%):

	O	Si	S	Fe	Zn
Спектр 1 Рис.4б	50,2	0,6	0,1	0,3	48,6
Спектр 2 Рис.4б	54,5	9,2	0,1	0,3	35,7

Результаты восстановления железа. Восстановительный обжиг медеплавильного шлака проводили в герметизированной печи Таммана. Температуру вос-

становления в смеси порошков шлака и угля выбирали на 30–60 градусов ниже температуры начала плавления шлака (приблизительно 1050°C). После выдержки в печи Таммана при 980°C в течение 2 часов появились корольки железа размером 5...20 мкм с примесью меди, но чистых по сере (рисунок 5а, табл. 2). В результате восстановления при этой температуре в оксидной фазе исчез магнетит, но оксидное железо сохранилось в фаялите.

Восстановление в окомкованом материале. В целях безопасности и удаления влаги во всех экспериментах окатыши сушили. Окатыши были приготовлены следующим образом: уголь смешивался со шлаком с добавлением связки (жидкое стекло). Это при перемешивании приводило к слипанию механической смеси. Эксперименты по восстановлению металла проводили в герметизированной печи Таммана при 1020°C и выдержке 1 час. Скорость восстановления железа в окатышах оказалась в 3–4 раза больше, чем в механической смеси. Так, при выдержке 1 час при температуре 1020°C содержание железа уменьшилось до 10%, а размер корольков увеличился до 20–50 мкм (рис. 5б и табл. 2). Дальнейшее увеличение продолжительности выдержки и увеличение температуры не привело к снижению содержания железа в оксидной фазе восстанавливаемого материала.

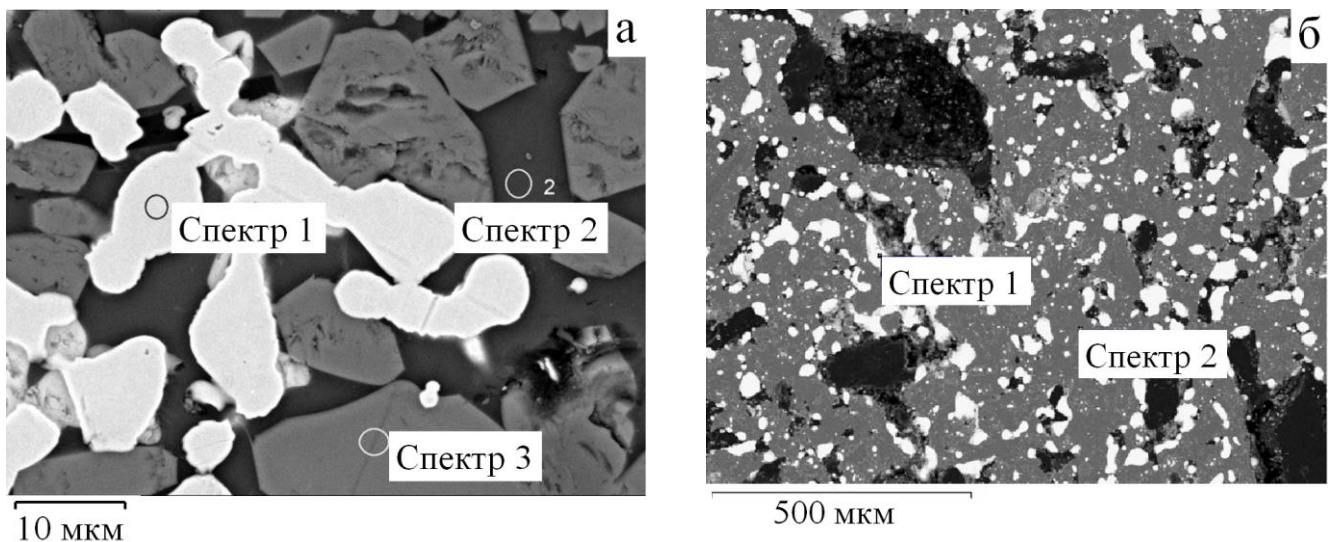


Рисунок 5 – Продукты восстановления в смеси порошков при 980°C и выдержке в течение 2 часов (а) и в окомкованом материале при 1020°C в течение 1 часа.

Таблица 2 – Химический состав фаз в местах анализа

Участок анализа	Содержание элементов, ат. %									Преобладающие фазы в спектрах
	O	Mg	Al	Si	Ca	S	Fe	Cu	Zn	
980°C в течение 2 часов										
Спектр 1 Рис.5а	0	0,1	0,3	0,4	0,1	0	96,9	2,0	0,1	металл
Спектр 2 Рис.5а	59	0,2	4,5	22,5	4,7	0	7,5	0,0	1,3	пироксен (CaFeSi ₂ O ₆)
Спектр 3 Рис.5а	54	2,1	0,1	15,9	0,4	0	25,4	0,0	2,0	фаялит (2FeO·SiO ₂)
1020°C в течение 1 часа										
Спектр 1 Рис.5б	0	0	0	0,3	0	0	98,5	1,5	–	металл
Спектр 2 Рис.5б	1,4	0,3	5,7	24,8	4,6	0	3,1	0,0	–	пироксен (CaFeSi ₂ O ₆)

Результаты пирометаллургического разделения продуктов восстановления. Полученные в корундовом тигле слитки металла по химическому составу близки к составу стали, однако содержат около 1% (ат.) серы (рис. 6, а). Возможно,

чистые по сере корольки металла, образовавшиеся в процессе твердофазного восстановления, при плавлении вобрала в себя серу из остаточного шлака и золы угля.

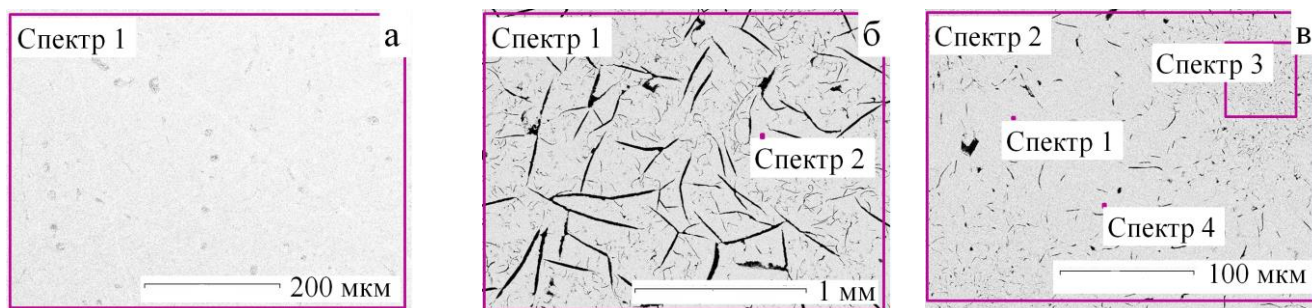


Рисунок 6 – Результаты пирометаллургического разделения продуктов металлизации в корундовом (а) и в графитовом (б и в) тигле.

Таблица 3 –Химический состав металлов после пирометаллургического разделения, ат. %.

Участок анализа	C	Si	S	Fe	Cu
Спектр 1, Рис.6а	1	2,1	0,1	96,3	0,4
Спектр 1, Рис.6б	1	0,6	0,7	96,7	0,9
Спектр 2, Рис.6б	5	0,8	0	92,9	1,2
Спектр 1, Рис.6в	0	11,4	0	87,6	0,9
Спектр 2, Рис.6в	2	11,2	0	85,4	1,2
Спектр 3, Рис.6в	2	11,9	0,1	85,0	0,9
Спектр 4, Рис.6в	6	9,5	0	73,1	1,4

В результате плавления в индукционной печи получили чугун или сплав с повышенным содержанием кремния (рис. 6, б и в). Для получения чугуна продукты металлизации расплавляли и после непродолжительной выдержки расплава в тигле сливали в изложницу. Полученный таким образом металлический слиток имел белый цвет в изломе и хрупко разрушался под молотом. По химическому составу и микроструктуре сплав сопоставим с чугуном (рис. 6, б). Для получения сплава с повышенным содержанием кремния продолжительность выдержки расплава в графитовом тигле увеличили до 10...15 минут. Полученный в результате разделения металлический слиток в изломе имел серый цвет и по химическому составу сопоставим с тройным сплавом железо–углерод–кремний с высоким содержанием кремния и практически не содержит серы (рисунок 5,в; табл. 3). Получаемый после разделения продуктов восстановления плавлением шлак имеет черный цвет и стекловиден в изломе. Основной составляющей шлака является оксид кремния, содержание которого зависит от способа разделения продуктов восстановления. После плавки в графитовом тигле содержание кремнезёма в шлаке меньше в сравнении с его содержанием в шлаке после плавки в корундовом тигле. Содержание железа не более одного процента, в шлаке присутствуют также оксиды магния, алюминия и кальция. По химическому составу он аналогичен доменному шлаку, но с более низким содержанием оксида кальция. В шлаке присутствуют также корольки металла (рисунок 7).

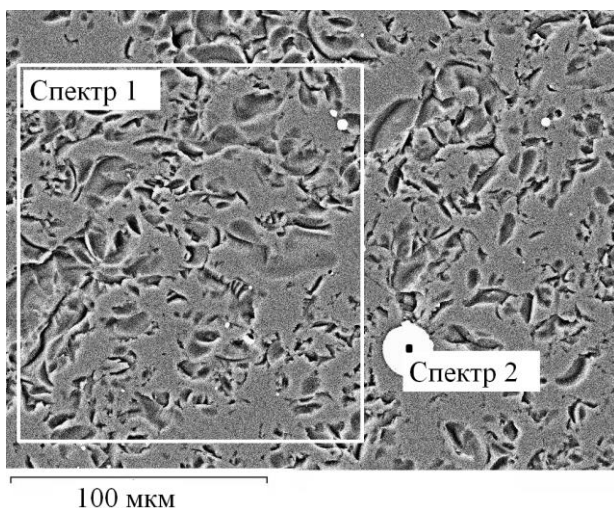


Рисунок 7 – Вид и состав (ат.%) шлака, полученного в печи сопротивления с корундовым тиглем:

Участок анализа	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu
Спектр 1 Рис. 7	58,1	2,6	6,7	20,6	0,1	11,2	0,7	0,1
Спектр 2 Рис. 7	0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	98,9	0,5

свойств используют различные легирующие добавки, изменяющие структуру чугуна и улучшающие показатели износостойкости и ударостойкости. Одной из таких добавок является медь. Введение меди повышает пластичность металла, что положительно сказывается на показателях износостойкости. Положительное влияние легирования медью чугуна для литых мелющих тел отмечено во многих публикациях. Однако содержание меди в подавляющем большинстве сортов стали и чугуна, используемых в металлургии, ограничено 0,3%.

Кроме того, мелющие шары являются расходным материалом, они быстро изнашиваются (износ до 0,5–2,0 кг/т) вследствие абразивного действия размалываемого материала. Расходы на их приобретение составляют по разным оценкам от 15 до 35% от общих технологических затрат соответствующих производств. При затратах на переработку сырья возрастает уровень потребления мелющих шаров. Это приводит к снижению показателей эффективности работы размольного оборудования, а также ведет к ухудшению качества производимой продукции. Поэтому необходимо повышение стойкости мелющих шаров при сохранении низкого уровня их стоимости. Эта задача может быть решена при использовании чугуна, получаемого при извлечении железа из шлаков медеплавильного производства.

Для изготовления мелющих тел из медьсодержащего материала используются белые износостойкие эвтектические чугуны. Для оценки фазовых и структурных составляющих в получаемых сплавах из материала переработки шлаков требуется дополнительные знания фазовых превращений в системе железо–углерод в присутствии меди и кремния.

Для оценки фазовых и структурных составляющих мелющих тел, изготавливаемых из чугуна с повышенным содержанием меди и кремния, рассчитали фазовые

Третья глава посвящена использованию медьсеросодержащего металла в качестве сырья для изготовления мелющих тел. Полученный после пирометаллургического разделения металл содержит медь, что ограничит его использовать его при выплавке большинства марок стали. В связи с этим одним из перспективных направлений утилизации медеплавильных шлаков является использование восстановленного металла в качестве материала для получения мелющих шаров.

Известно, что при производстве чугуновых мелющих тел для получения необходимых эксплуатационных

равновесия в системе железо–углерод при добавлении меди и кремния. Расчёт проводили с использованием программного комплекса ThermoCalc. Для построения диаграммы состояния системы железо–углерод в присутствии примесей меди и кремния использовали метод Calphad в программном комплексе ThermoCalc с базой данных TC BIN: TC Binary Solutions v1.1. Метод Calphad в программном комплексе ThermoCalc основан на выводе термодинамических функций системы из всех доступных экспериментальных данных, где термодинамические функции представлены в виде полиномов химического состава и температуры

Для определения фазовых превращений на диаграмме состояния «железо–углерод» при расчетах в систему добавляли медь в количестве от 0 до 1,5% и кремний в пределах 0–3,5%. При этом давление принимали равным 1,0 атм., а температурные диапазоны определялись автоматически.

Расчёты показали, что присутствие примесей меди и кремния в указанных выше пределах приводит к изменению растворимости углерода в фазах системы железо–углерод. Медь в количестве от 0 до 1,5% незначительно (с 2,14% до 2,0%) уменьшает растворимость углерода в аустените. При добавлении кремния от 0 до 3,5% на вертикальном разрезе системы железо–углерод–медь (1%) происходит понижение растворимости углерода в ГЦК решетке аустенита с 2,14% до 1,5%. Также наблюдается расширение области существования феррита и смещение эвтектической точки до концентрации углерода 3,2% (рисунок 8).

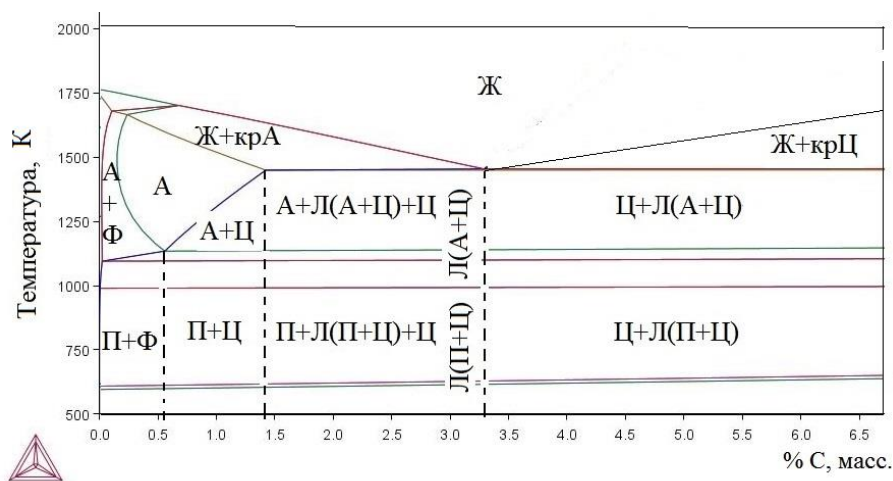


Рисунок 8 – Вертикальный разрез диаграммы системы железо–углерод–медь(1%) при содержании кремния 3,5%.

Согласно результатам расчетов для получения белого износостойкого чугуна эвтектического состава, пригодного для изготовления мелющих шаров с высокими эксплуатационными характеристиками, необходимо в материале переработки шлаков иметь содержание меди около 1%, и около 3,5% кремния при содержании углерода около 3,5%.

Однако при литье металла в кокиль твердость мелющих тел (рисунок 9) из чугуна такого состава соответствует стандартам ГОСТ лишь на поверхности шара, а в глубине тела шара существенно меньше. Обычно для получения мелющих тел из белого чугуна его дополнительно легируют отбеливающими элементами – хромом, марганцем и другими. Однако использование легирующих элементов значительно влияет на стоимость мелющих тел. Чтобы не повышать стоимость мелющих тел в качестве отбеливающих элементов целесообразно использовать элементы, ко-

которые уже присутствуют в медеплавильном шлаке. Одним из таких элементов может быть сера. В результате проведенного нами анализа литературного материала по влиянию серы на твердость металла не обнаружено ни отечественных, ни зарубежных работ по влиянию серы на твердость металла. Однако в ряде литературных источников отмечается положительное влияние серы на отбеливание отливок, что косвенно может свидетельствовать о повышении твердости мелющих шаров.



Рисунок 9 – Мелющие тела.

Для определения влияния серы на отбеливание чугуновых заготовок для мелющих шаров были проведены дополнительные эксперименты. В качестве исходного материала использовали чугун марки МС–140 500. Для изучения влияния серы на отбел чугунов предварительно были приготовлены специальные формы. Чугун расплавлялся в корундовом тигле в печи Таммана. Сера в виде пирита присаживали в конце плавки чугуна. Полученные при разливке кли-

новые отливки исследовали на оптическом и электронном микроскопах для определения влияния серы на структуру чугуна и использовали для измерения твердости полученных образцов.

Исследование модельных образцов на оптическом микроскопе показывает влияние серы на изменение структуры чугунов. Добавление серы 0.25% в расплавленный серый чугун ведет к образованию ледебуритной структуры в зоне быстрого охлаждения и появлению цементита, положительно влияющего на повышение твердости, в участках с более медленным охлаждением. В образующейся ледебуритной структуре присутствуют два вида цементита: сотовый и пластинчатый. Дополнительное добавление серы приводит к росту ледебуритной структуры вдоль образца и исчезновению сотового цементита в эвтектике. Однако сотовый цементит наблюдается в образце, в котором отбел происходит почти по всему объему. Связано это с увеличением количества центров кристаллизации, приводящим к более равномерному распределению углерода. Тем самым, подтверждено, что повышение содержания серы в металле с 0% до 1.0%, повышает отбел заготовки с 2% до 95% (рисунок 10).

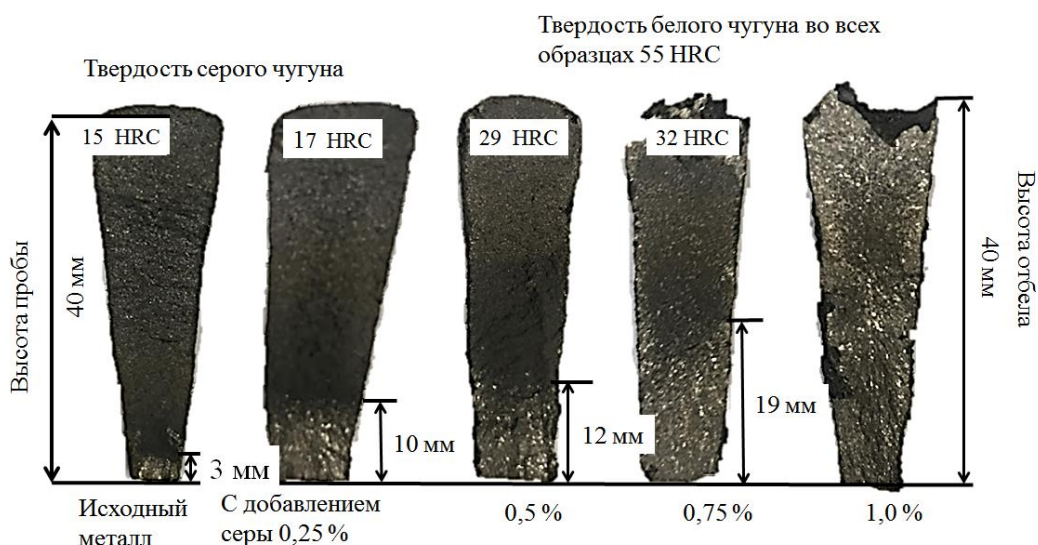


Рисунок 10 – Влияние добавления серы на глубину отбела чугуна.

Влияние углерода и кремния на твердость шаров хорошо изучено, однако не было изучено влияние углерода и кремния при отбеливании чугуна серой. Поскольку сера увеличивает зону отбела, эксперименты проводили при суммарном содержании серы и меди в металле около 2 масс.%. В качестве металла использовали сталь, полученную из восстановленного в медеплавильном шлаке железа. После расплавления стали в индукционной печи в расплав добавляли ферросилиций и (или) углерод в количествах, обеспечивающих получение металла нужного состава.

Установлено, что добавки кремния до пределов его растворимости в феррите увеличивает твердость мелющих шаров с 45 до 60 HRC (рисунок 11), Влияние углерода на твердость соответствует литературным данным и увеличивает твердость белого чугуна.

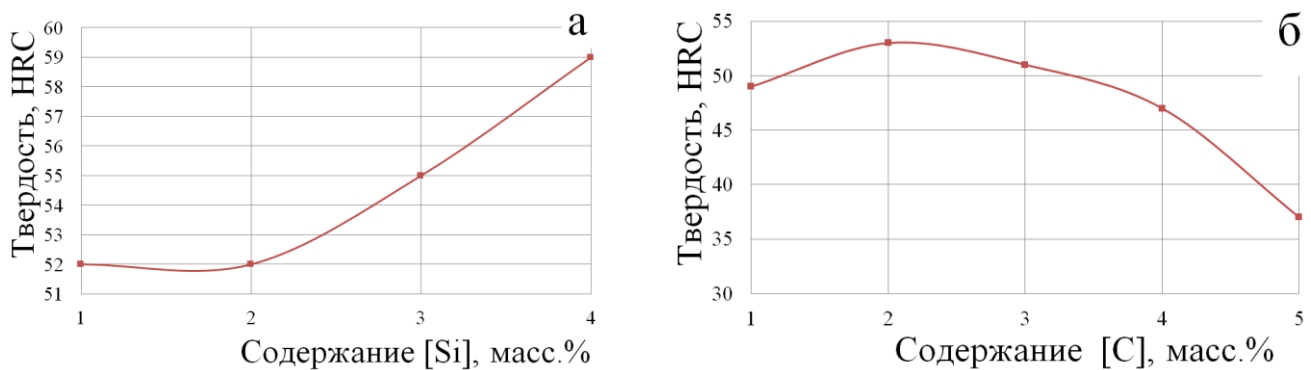


Рисунок 11 – Влияния концентраций кремния (а) и углерода (б) на твердость чугуна для мелющих шаров.

Четвертая глава посвящена утилизации вторичного шлака в качестве сырья для производства пропантов. Пропант (рисунок 12) (propping agent — расклинивающий агент) — материал в виде мелких гранул, который используется для повышения дебета скважин при операции гидроразрыва пласта в нефтедобывающей промышленности. Служит для заполнения с целью предотвращения смыкания образующихся при гидроразрыве трещин в породе. В 2018 г. емкость российского рынка пропантов превысила 1,5 млн т.

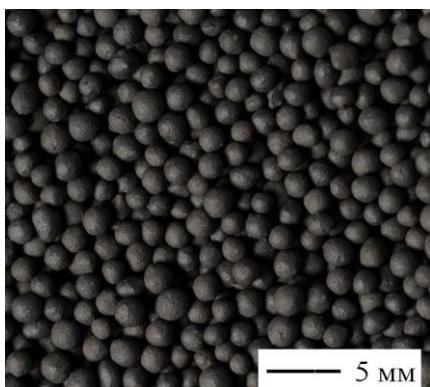


Рисунок 12 – Опытные образцы пропантов.

Утилизация вторичного шлака в качестве сырья для изготовления пропантов позволяет рационально использовать не только материал, но и тепло расплавленного шлака после пирометаллургического разделения продуктов восстановления. Шлак с добавлением MgO расплавляли в индукционной печи. После полного расплавления шлака и модифицирующих добавок расплав выдерживали в течение 10 минут и разливали на вращающийся диск. В результате центробежного распыления материал гранулируется. Полученные гранулы отсеивали по фракциям и сортировали по степени сферичности на сферичные и несферичные гранулы. Несферичные гранулы направляли на повторный переплав и грануляцию. Сферичные гранулы подвергали испытаниям согласно ГОСТ Р 54571–2011 «Пропанты магнезиально–кварцевые».

При гранулировании расплавленного шлака получают стекловидные гранулы, не удовлетворяющие показателям прочности на раздавливание. Использование

стекловидных гранул в качестве пропантов для нефтедобывающей промышленности невозможно.

Установлено, что кристаллизация пропантов начинается при температуре 300 °С, когда появляются фазы SiO_2 , 2CaOSiO_2 и 2MgOSiO_2 . При дальнейшем повышении температуры появление новых фаз не наблюдается, однако наблюдается рост кристаллов, при этом при температуре 800 °С наблюдается резкий рост фаз. При этой температуре наблюдаются фазы Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ и MgO , однако полная кристаллизация наблюдается лишь при температуре 1000 °С (рисунок 13).

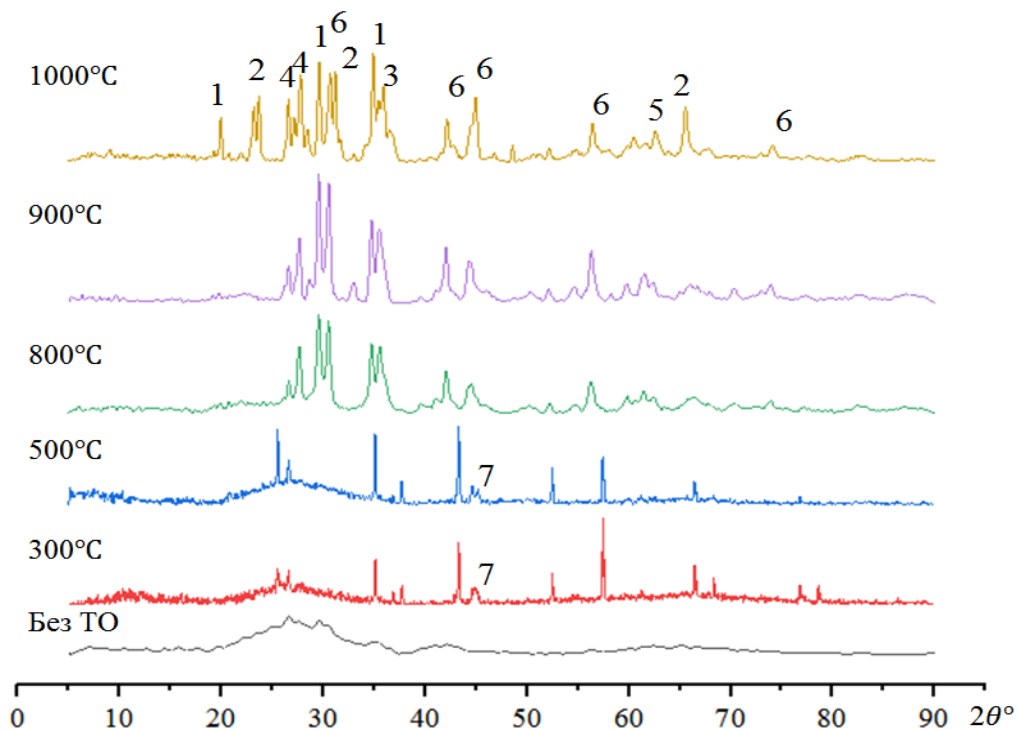


Рисунок 13 – Дифрактограммы до и после термообработки: 1- SiO_2 , 2 - $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, 3 - Al_2O_3 , 4 - $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$, 5- MgO 6- $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, 7- Fe.

Стоит отметить, что прочность пропантов фракций 0,63–1,0 мм возросла до 30% разрушенных при давлении 34,5 МПа, при температуре 800 °С, при дальнейшем повышении температуры повышения прочности пропантов не наблюдалось. По этой причине было предложено увеличить время выдержки пропантов при температурах 300 °С и 800 °С. Первое значение соответствует зарождению новых фаз, второе значение соответствует завершению кристаллизации. Установлено, что при выдержке 60 минут при температуре 800 °С происходит полное завершение кристаллизации, а прочность пропантов фракций 0,63–1,0 мм повышается до 10% разрушенных при давлении 34,5 МПа.

В результате опытных экспериментов установлено также, что повышение концентрации MgO с 5 до 16 масс.% повышает прочность пропантов фракции 0,63–1,0 при давлении 34,5 МПа до 3% разрушенных при испытании на раздавливание (таблица 4). При изучении образцов пропантов с добавлением MgO на электронном микроскопе установлено, что повышение прочности пропантов обусловлено измельчением микроструктуры пропантов: при повышении концентрации MgO с 5 до 11 масс% размер зерен уменьшается с 1 мкм до 0,5 мкм, а при повышении концентрации до 16 масс% - до 0,2 мкм. (рисунок 14).

Таблица 4 – Результаты испытания пропантов на раздавливание

Давление, МПа	Фракция, мм	Допустимая доля разрушенных гранул по ГОСТ, %	Доля разрушенных гранулы после термообработки, %
34.5	0,63 ... 1,0	10	3
	1,0 ... 1,6	15	4
51.7	0,63 ... 1,0	15	9
	1,0 ... 1,6	20	11
68.9	0,63 ... 1,0	20	10
	1,0 ... 1,6	25	19
86.1	0,63 ... 1,0		20

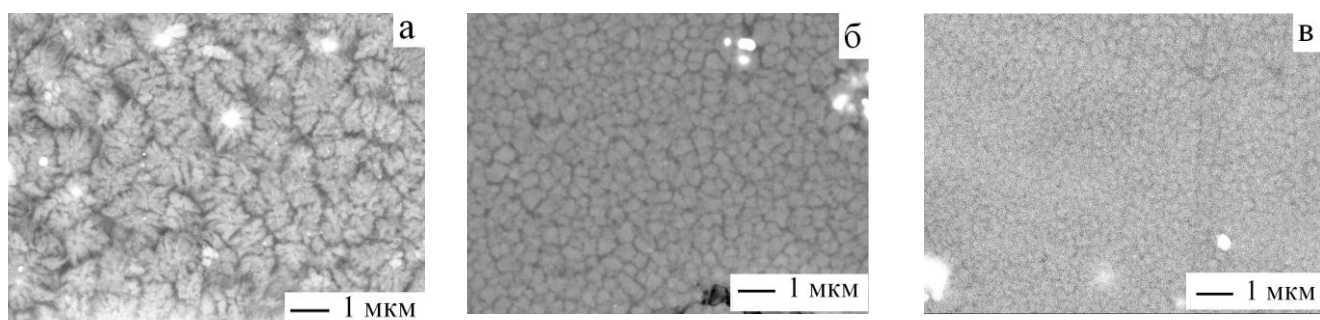


Рисунок 14 – Структура пропантов с разным содержанием MgO: (а) – 6, (б) – 11, (в) – 16 масс. %.

Одной из важнейших характеристик керамических пропантов согласно ГОСТ Р 54571–2011 является устойчивость (нерастворимость) пропантов в смеси кислот. Совместно с РГУ НГ имени И.М. Губкина проведены эксперименты по изучению растворимости полученных нами пропантов в смеси соляной и фторной кислот. Пропанты фракции 1,0...1,6 мм испытывали по методике стандарта ГОСТ Р 54571–2011 в смеси соляной и фторной кислот с соотношением концентрации 4:1. Растворимость полученных нами пропантов составила 14,8 и 19,4%, что выше максимально допустимого значения (не более 10%) для магнезиально–кварцевых пропантов. Таким образом, результаты определения кислотостойкости оказались неудовлетворительными, что, по–видимому, обусловлено относительно высоким содержанием в них оксидов кальция и натрия.

В связи с неудовлетворительными показателями по кислотостойкости были предприняты меры по улучшения показателей путем покрытия пропантов фенолформальдегидной смолой (бакелитом).

В результате растворимость пропантов в смеси кислот с разными слоями покрытия возросла. В образце № 1 определена кислотостойкость пропантов без защитного покрытия. В образцах № 2, № 5 и № 6 определена растворимость пропантов с одним защитным слоем. В образцах № 3 и № 4 приведены кислотостойкость пропантов с двумя и тремя слоями защитного покрытия. Наилучшие показатели наблюдаются в образцах № 3 и № 4, неудовлетворительные показатели наблюдаются в образце № 1 (рисунок 15, таблица 5).

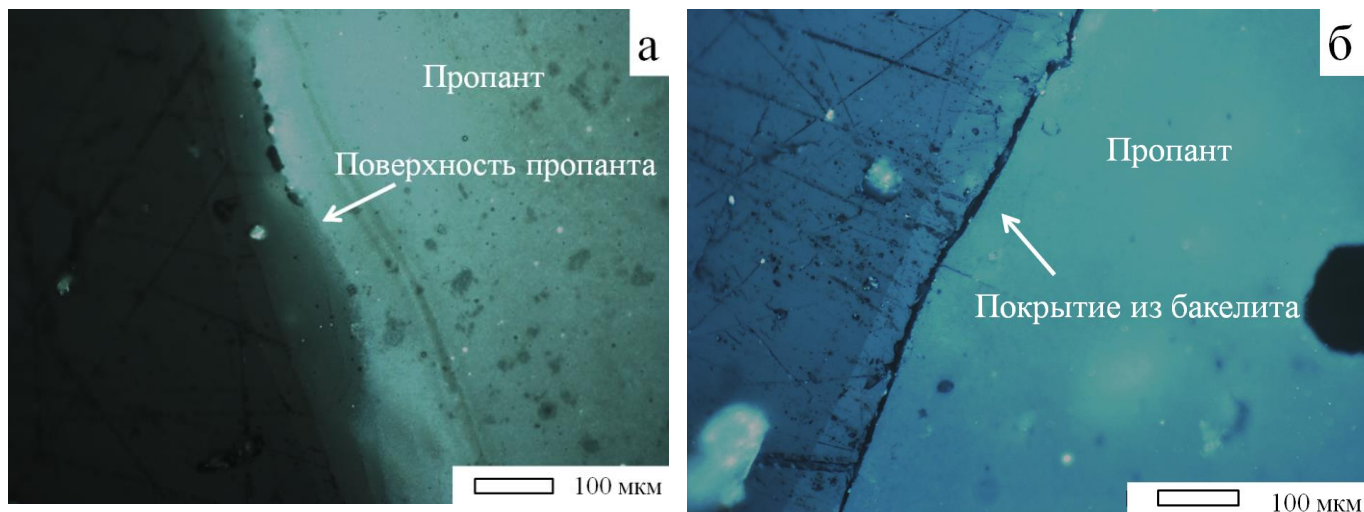


Рисунок 15 – Вид поверхности пропантов в разрезе без защитного покрытия (а) и с покрытием в три слоя (б).

Таблица 5 – Результаты испытания пропантов на кислотостойкость

№	Масса пропантов до нанесения покрытия, г	Количество добавленного бакелита, мл	Количество слоев защитного покрытия	Масса пропантов после нанесения покрытия, г	Растворимость, (% потери массы)
1	50	0	0	50	19
2	50	1	1	51	9
3	50	2	2	52	4
4	50	3	3	53	2
5	50	2	1	52	8
6	50	3	1	53	7

Показатели растворимости образцов № 2, № 5, № 6 незначительно отличаются, так как при нанесении одного защитного слоя покрытия пропантов получаются не монолитными, и это обуславливает растворимость при наличии дефектов в покрытиях пропанта.

Пятая глава посвящена расчету экономического эффекта и технологическим рекомендациям переработки медеплавильных шлаков.

Для определения экономического эффекта рассчитаны тепловые балансы металлизации окатышей и разделительной плавки продуктов металлизации. Для упрощения расчета принято, что из 100 кг шлака усредненного состава получается 60 кг шлаковой фазы и 40 кг сплава. В результате рассчитали, что для металлизации 1 т окатышей во вращающийся печи расходуется 3766 МДж энергии. Для расчета экономического эффекта переработки медеплавильных шлаков принято, что при переработке 100 т шлака будет получено 40 т шаров, 2,5 т оксида цинка и 58 т пропантов (таблица 6). С учетом стоимости 1 т шаров 25 тыс. руб., 33 тыс. руб. за 1 т оксида цинка и 24,5 тыс. руб. 1 т пропантов ежемесячная прибыль будет составлять 74 млн. руб., а расходы 44 млн. руб. Основная доля расходов приходится на электроэнергию.

Таблица 6 – Экономический баланс переработки медеплавильных шлаков

Затраты в месяц, руб.		%	Прибыль в месяц, руб.	%	
Уголь	3 000 000	6,79	Шары	30000000	40,1405
Электроды, и др.	3 862 500	8,74	Оксид цинка	2475000	3,31159
Электроэнергия	31 035 000	70,22	Пропанты	42262500	56,5479
Зарплата персонала	2 300 000	5,20			
Прочие расходы	4 000 000	9,05			
Всего	44 197 500	100		74737500	100
Чистая прибыль				30 540000	

Рекомендации по использованию медеплавильных шлаков. Разработана общая технологическая схема переработки медеплавильных шлаков путем извлечения железа с получением востребованных металлических изделий и попутным извлечением цинка, а также глубокой переработки вторичных шлаков с получением пропантов для нефтегазовой индустрии (рисунок 16).



Рисунок 16 – Технологическая схема утилизации медеплавильного шлака.

Исходный шлак подвергается сушке, смешивается с предварительно измельченным восстановителем. Полученная смесь брикетуется. Брикеты высушиваются и подаются во вращающуюся трубчатую печь, где в восстановительной среде нагреваются при температурных режимах, обеспечивающих максимальное восстановление железа. Из отходящих из печи газов осаживается оксид цинка. Горячие продукты восстановления направляются в дуговую печь. В дуговой печи из продуктов восстановления производится чугун для отливки чугунных мелющих тел. Чугунный полупродукт после дуговой печи направляется в агрегат ковш–печь для внепечной обработки и доведения до требуемого химического состава и далее на разливочную машину для получения мелющих тел. Расплавленный сталеплавильный шлак корректируется по химическому составу и распыляется с получением гранул, используемых в качестве пропантов. Пропанты подвергаются термообработке по заранее определённым режимам, обеспечивающим полную кристаллизацию стеклообразного продукта. Остывшие пропанты покрываются фенолформальдегидной смолой.

Перспективы развития работы

Работа поддержана соглашением №604 от 22 декабря 2022 г. о предоставлении субсидий на реализацию научно–технических проектов Челябинской области, включенных в перечень проектов Уральского межрегионального научно–образовательного центра мирового уровня «Передовые производственные технологии и материалы». В настоящее время на производственной базе ООО «Теплострой» (г. Челябинск) создаётся пилотный участок по переработке медеплавильных шлаков по разработанной технологии с получением мелющих тел и пропантов. На основе полученных лабораторных и промышленных экспериментов можно будет разрабатывать технологические основы переработки медеплавильных шлаков и рекомендовать к продолжению исследования по переработке других шлаковых отвалах РФ с учетом особенностей отходов.

Выводы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения из медеплавильных шлаков оксида цинка, образовавшегося при окислении цинка в атмосфере воздуха, чугуна, стали или сплава железа с кремнием, а также шлака с низким содержанием железа.

2. Обосновано и подтверждено получение из металлосодержащей части медеплавильных шлаков мелющих тел методом литья в кокиль без добавления легирующих элементов.

3. Показано, что твердость и прочность мелющих шаров зависят от содержания в металле углерода, кремния, меди и серы. Углерод является основным структурообразующим элементом, присутствие кремния повышает содержание феррита в перлите, сера увеличивает содержание ледебуритной эвтектики в сером чугуне, медь повышает содержание аустенита.

4. Показана возможность получения высококачественного продукта для нефтедобывающей промышленности из вторично образующихся шлаков медеплавильного производства.

5. Показано, что прочность стекловидных пропантов, полученных методом центробежного гранулирования, повышается при проведении высокотемпературного обжига. Установлено, что повышение концентрации MgO от 5 масс.% до 16 масс.% повышает прочность пропантов с 10% разрушенных до 3% при давлении 34 МПа.

6. Установлено, что нанесение бакелитового защитного покрытия на поверхность пропантов повышает кислотостойкость, при этом растворимость пропантов в смеси кислот снизилась с 19 до 2%.

7. На основе результатов исследования предложена схема безотходной переработки медеплавильных шлаков, включающая предварительное твердофазное восстановление железа с одновременной возгонкой цинка во вращающейся печи и пирометаллургическое разделение продуктов восстановления в дуговой печи, что позволяет получить три востребованных продукта: оксид цинка, мелющие тела и пропанты.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации.

В рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Адилов Г., Поволоцкий А.Д., Зырянов С.В., Роцин В.Е. Получение расклинивающего материала (пропанта) для нефтедобывающей промышленности из металлургических шлаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия».2018. Т. 18, № 1. С. 58–63. [ВАК].

2. Рошин В.Е., Адилов Г., Поволоцкий А.Д., Потапов К.О. Комплексная переработка медеплавильных шлаков для получения востребованных продуктов // Электротехнология. 2019. № 4. С. 25–34. [ВАК, RSCI].

Roshchin V. E., Adilov G., Povolotskii A.D., Potapov K.O. Combined Processing of Copper–Smelting Slags for the Manufacture of Valuable Products // Russian Metallurgy (Metally), 2019. Vol. 2019, No. 12. Pp. 1289–1296 [Scopus, Q4]

3. Адилов Г., Поволоцкий А.Д., Рошин В.Е. Термодинамическое моделирование восстановления металлов в медеплавильных шлаках и экспериментальная проверка результатов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 581–589. [K1, ВАК, RSCI].

4. Адилов Г., Поволоцкий А.Д., Рошин В.Е. Комплексная безотходная технология переработки медеплавильных шлаков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2022. Т. 78. № 9. С. 801–811. [K2, ВАК].

5. Адилов Г., Поволоцкий А. Д., Рошин В. Е. Переработка вторичных шлаков после извлечения железа из шлаков медеплавильного производства с получением пропантов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79. № 12. С. 1039-1046. [K2, ВАК].

6. Адилов Г., Карева Н.Т., Рошин В.Е. Влияние меди и кремния на фазовые превращения в системе железо – углерод. // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2024;67(1):73-75. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-73> [K1, ВАК, RSCI].

В других изданиях

7. Рошин В.Е., Поволоцкий В.Д., Потапов К.О., Адилов Г. Концепция комплексной пирометаллургической переработки медеплавильных шлаков // XV Международный конгресс сталеплавильщиков. Сборник трудов. к 100–летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380–летию российской металлургии. 2018. С. 477–484.

8. Адилов Г., Поволоцкий А.Д. Использование металлургических шлаков в качестве материала для изготовления пропантов // Современные проблемы электротехнологии стали: материалы XVII Международной конференции: в 2 ч. / под ред. В.Е. Рошина. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2019. Ч. 2. С.141–147

9. Roshchin V.E., Adilov G., Povolotckii A.D., Kapelyushin Y. Complex Processing of Copper Smelting Slags with Obtaining of Cast Iron Grinding Media and Propants // IV Congress “Fundamental research and applied developing of recycling and utilization processes of technogenic formations”, KnE Materials Science. 2020. Vol. 2020, No. 12. Pp.462–471.

10. Roshchin V.E., Adilov G.A., Povolotckii A.D. Possibility of complete processing of copper slags and obtaining of demanded products // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. XVII International Forum–Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts. Saint–Petersburg, 2020. Pp. 192–193.

11. Адилов Г., Рошин В.Е. Полная переработка отвальных шлаков медеплавильного производства с улавливанием оксидов цинка, получением чугуновых и керамических изделий // Сборник трудов XVII международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла «От руды до стали» ISCON, г. Магнитогорск, 2023. С. 217-221.

12. Рошин В.Е., Адилов Г., Поволоцкий А.Д. Итоги лабораторной стадии разработки технологии полной переработки отвальных медеплавильных шлаков с получением востребованных металлических и керамических изделий // Труды VI Конгресса с международным участием «ТЕХНОГЕН–2023 », г. Екатеринбург, 2023. С. 120-122.

Адилов Галымжан

РАЗРАБОТКА ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ВОСТРЕБОВАННЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Специальность 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 01.07.2024. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. 1. Тираж 100 экз. Заказ 198/269.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.