

На правах рукописи



ЛОБАНОВ Даниил Андреевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ  
ШЛАКОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА С ПОЛУЧЕНИЕМ ТОВАРНЫХ ПРОДУКТОВ**

Специальность 05.16.07 – Metallургия техногенных и вторичных ресурсов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель доктор технических наук  
Шешуков Олег Юрьевич

Официальные оппоненты: Чуманов Илья Валерьевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Южно-Уральский  
государственный университет (национальный  
исследовательский университет)», заведующий  
кафедрой общей металлургии, г. Челябинск

Демин Борис Леонидович,  
кандидат технических наук, АО «Уральский  
институт металлов», исполнительный директор  
НИЦ «Переработка и использование  
техногенных отходов», г. Екатеринбург

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

Защита состоится «14» мая 2021 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 004.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Дмитриев Андрей Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в черной металлургии всё более острой становится проблема комплексного и максимального использования имеющегося сырья. Причиной этому служит истощение эксплуатируемых источников минерального сырья, в то время как новые месторождения более бедны, и, как правило, зачастую расположены на территориях со слабо развитой транспортной и энергетической инфраструктурой. Одним из решений данной проблемы с давних времен является использование, как текущих отходов, так и уже имеющихся техногенных образований.

Существующий научный и практический опыт показывает, что техногенные образования негативно влияют как на экологическую обстановку, так и на экономику металлургических предприятий, что обуславливает необходимость их переработки. Переработка техногенных образований позволяет снизить антропогенную нагрузку на окружающую природную среду и улучшить экологическую обстановку в регионе. Комплексное и максимальное использование сырья обуславливает сохранение природных ресурсов и позволяет вернуть в хозяйственный оборот уже накопленные отходы. В этом плане особо важной задачей становится разработка, применение и внедрение комплексных безотходных технологий, которые позволят полностью утилизировать существующие техногенные образования и получить из них новое качественное сырьё, значительно сэкономят материалы и ресурсы, одновременно освободить окружающую среду от негативного влияния отвалов.

В черной металлургии наиболее крупнотоннажным отходом сталеплавильного производства, составляющим основной объем техногенных образований (около 80-85 % от общего количества твердых отходов), являются шлаки, представленные конвертерными или электропечными (далее обозначим ДСП) и ковшевыми (АКП) шлаками. При этом, как шлаки ДСП, так и шлаки АКП, содержат в себе такие элементы, которые не извлекаются имеющимися в настоящее время технологиями шлакопереработки, но при этом представляют большую ценность для получения различных товарных продуктов.

**Степень разработанности темы исследования.** Анализ имеющихся работ показывает, что совместная комплексная переработка указанных шлаков предстанет как новый подход в переработке шлаковых образований. В работах, представляющих рассматриваемую тематику, показаны методы переработки шлаков, направленные на извлечение либо металлической, либо неметаллической части шлака. Т.е. шлаки перерабатывают не полностью, а именно: например, при утилизации шлака АКП остается не переработанной металлическая или неаустабильизированная часть шлака, а при утилизации шлака ДСП используется лишь его неметаллическая или металлическая часть, оставляя неиспользованной вторую составляющую этого шлака.

Данное положение указывает на необходимость переработки шлаковых отвалов и свидетельствует о том, что из них можно извлечь ценные компоненты или получить товарный продукт.

**Объект исследования** – техногенные шлаковые образования сталеплавильного производства (электропечные шлаки и ковшевые шлаки).

**Предмет исследования** – технология совместной безотходной переработки электропечного и ковшевого шлаков.

**Целью диссертационной работы** является разработка безотходной технологии совместной переработки электропечного и ковшевого шлаков. При этом получаемые продукты переработки должны быть товарного качества, соответствующие нормативным документам.

**Задачи,** поставленные в соответствии с целью:

– анализ литературных источников по теме переработки промышленных электропечных и рафинировочных шлаков, образующихся на предприятиях сталеплавильного производства;

– определение границ исследования, моделирование и анализ шихтовых составов, необходимых для реализации цели;

– исследование возможности получения из электропечного и ковшевого шлаков стабилизированного продукта (клинкера) на основе проведенного моделирования;

- исследование возможности получения одновременно цементного клинкера и передельного чугуна при переработке электропечного и ковшевого шлаков в соответствии с полученными в ходе экспериментов данными;
- определение технологических условий и шихтовых составов для совместной утилизации шлаков с получением из них товарных продуктов;
- проведение опытно-промышленных испытаний разработанной технологии.

### **Научная новизна**

1. Определены области химического состава шлаков, стабильно обеспечивающие получение портландцементного клинкера.
2. Определен оптимальный диапазон температур и температурный режим, пригодный для проведения утилизации шлаков.
3. Получены значения по вязкости и фазам составов шлаков, находящихся в области составов клинкера, в зависимости от их состава и температуры, что обеспечивает полное разделение металла и шлака, обеспечивающее получение товарных продуктов.
4. На основе исследований характеристик шлаковых расплавов, рекомендованы химические составы шихты, обеспечивающие получение портландцементного клинкера.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Определены границы составов в системе  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ , обеспечивающие получение жидкоподвижных шлаков и соответствующие составу портландцементного клинкера.
2. Предложены шихтовые составы, которые могут быть использованы для совместной и безотходной утилизации шлаков АКП и ДСП, а также, при наличии, отходов извести.
3. Разработана технологическая схема безотходной переработки шлаков АКП и ДСП, которая может быть внедрена в производство для получения портландцементного клинкера и чугуна товарного качества.

### **Методология и методы исследования**

Работа выполнена с использованием современных методов рентгенофазового анализа на дифрактометрах Bruker D8 Advance и XRD 7000 C

Shimadzu с высоко- и низкотемпературными камерами и зеркалом Гебеля. Фазы изучали с помощью электронного сканирующего микроскопа «CarlZeiss EVO 40» с приставкой для анализа дифракционных картин HKL EBSD Channel 5. Термогравиметрические исследования проводили на сканирующем калориметре «СТА 449 F3 Jupiter». Симплекс-решетчатое планирование и построение графиков проводили в программе STATISTICA 12.7, расчёты проводили в Microsoft Excel 2017 с использованием полимерной модели строения шлаков.

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

1. Границы составов, обеспечивающие получение жидкоподвижных шлаков и при этом попадающих в область портландцементного клинкера.
2. Химические составы компонентов, которые должны быть в шихте плавки для получения чугуна и клинкера товарного качества.
3. Технология совместной переработки АКП и ДСП шлаков с привлечением отходов извести в роторно-наклонной печи.

**Достоверность экспериментальных результатов** работы основана на применении для экспериментов современного оборудования и установок, входящих в центр коллективного пользования «Урал-М», воспроизводимости результатов, использовании комплекса современных методов исследования и общепринятых методик экспериментов.

### **Апробация работы**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской междисциплинарной молодежной конференции с международным участием «V Информационная школа молодого ученого» (Екатеринбург, 2015 г.); IV и VII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2017» и «ФТИ-2020» (Екатеринбург, 2017, 2020 г.); 74, 75 и 76-ых Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2016, 2017, 2018 г.); III конгрессе «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Екатеринбург, 2017 г.);

Международной научно-технической конференции ICIE-2018 «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, Москва, 2018 г.); XV Международном Конгрессе сталеплавателей и производителей металла – ISCON 2018 (Тула, 2018 г.).

**Личный вклад автора** состоит в проведении литературного обзора, постановке задач исследования, планировании и непосредственном выполнении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, подготовке публикаций, обсуждении ключевых положений работы на научных конференциях.

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 17 работах, 6 из которых в зарубежных изданиях, рецензируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 10 – в других изданиях и сборниках конференций, 1 патент.

**Связь диссертации с планами НИР.** Исследование выполнено в рамках государственного задания ИМЕТ УрО РАН № 0396-2015-0083 «Переработка техногенных отходов (шлаков сталеплавильного производства) методами пирометаллургии с целью расширения сырьевой (или ресурсной) базы черной металлургии и строительной отрасли, повышения качества и снижения себестоимости металлопродукции» (2016-2018 гг.).

**Соответствие диссертации научной специальности.** Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.16.07 – Металлургия техногенных и вторичных ресурсов: п. 6 «Процессы подготовки техногенного сырья к промышленному использованию», п. 8 «Комплексное использование природного и техногенного сырья», п. 9 «Рециклинг материалов» и п. 11 «Разработка технологий и конструкций для использования техногенного сырья».

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, рекомендаций для дальнейшего применения результатов работы, списка сокращений и условных обозначений, изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 37 рисунков, 35 таблиц, 3 приложения, список литературы включает 166 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описана актуальность темы диссертационной работы, представлены её цель и задачи, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы.

**В первой главе** приведён аналитический обзор литературы по теме исследования. В главе рассматриваются имеющиеся исследования по переработке ковшевого и электропечного шлака, дана характеристика каждого типа шлаков, приведены их физико-химические и технологические свойства, показаны способы переработки приведенных шлаков, указаны достоинства и недостатки схем переработок.

Отмечено, что после переработки каждого из шлаков, от них остается ценный остаток, который направляется в отвал, хотя, вместо этого, он мог бы быть повторно использован. Также указывается, что на данный момент не существует безотходных технологий переработки указанных шлаков, как по отдельности, так и совместно.

**Во второй главе** путем симплекс-решетчатого планирования и использования тройных фазовых диаграмм была определена первая область экспериментов А-В-С (рис. 1), соответствующая составам портландцементного клинкера (ПЦ) и жидкоподвижным шлакам. Проведены предварительные расчёты и моделирование шихтовки составов смесей.

Область А-В-С, разбита симплекс-решетчатым планированием на 14 точек с шагом в 4,75 масс. % по содержанию  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при постоянном содержании  $\text{MgO}$  в 5 масс. %. Под каждую из 14 точек подобрана шихта из чистых реагентов. Реагенты для смесей подобраны так, чтобы моделировали реальные шлаки АКП и ДСП, в случае необходимости добавлялась обожженная известь.

В конечном итоге путём моделирования и расчётов с помощью полимерной модели строения шлаков показано, что все точки составов в области А-В-С не только охватывают составы ковшевого и электропечного шлаков, но и пригодны для получения портландцементного клинкера со значениями

жидкоподвижности (вязкость составила от 0,1 до 0,6 Па·с), указывающими на оптимальность протекания технологического процесса, позволяющую отделять металлическую часть от силикатной.

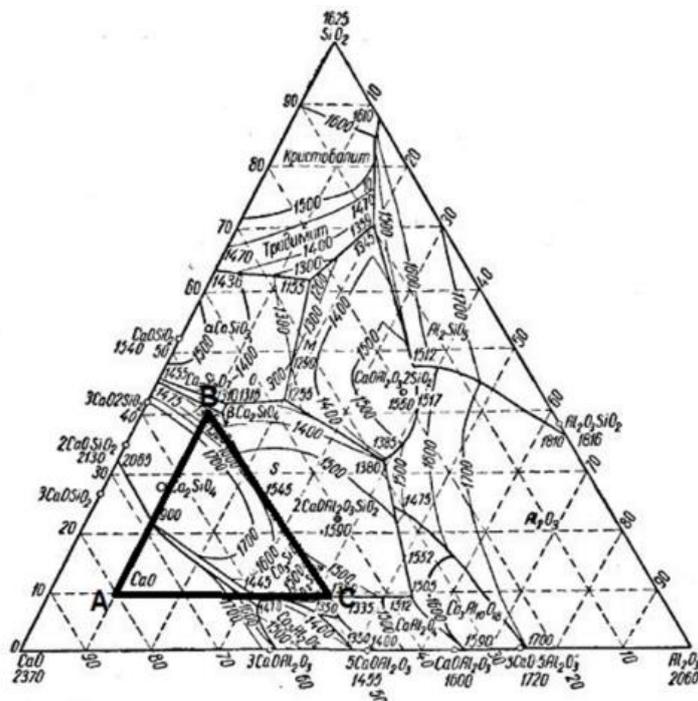


Рисунок 1 – Область диаграммы состояния тройной системы  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , соответствующая составам рафинировочного и электропечного шлака

При превышении 10 масс. % содержания твёрдых частиц в шлаке, шлак оказывает сопротивление находящемуся в нём телу – частицам свободной извести, что также негативно сказывается на протекании процесса. Однако, полученные расчётные минимальные (менее 10 масс. %) или отсутствующие значения по количеству свободных частиц свободной извести, лишь дополнительно указывают на оптимальность протекания технологического процесса.

Данные заключения указали на необходимость экспериментальной проверки возможности получения портландцементного клинкера при одновременном получении металлургического чугуна исходя из смоделированной шихтовки.

**В третьей главе** представлен ход исследования, в котором как конечные, так и промежуточные результаты несут в себе научную новизну. По итогам экспериментальной проверки было показано, что все составы, за исключением образца, находящегося в углу А диаграммы А-В-С (рис. 1), обладают

оптимальной жидкоподвижностью от 0,1 до 0,6 Па·с при конечных температурах 1540-1560 °С с выдержкой в 10 мин. Представленные температуры были использованы в последствии для получения жидкоподвижного шлака.

При снижении температуры вязкость шлаков начинает возрастать, что ухудшает жидкоподвижность. Также был получен лишь один состав среди всех (точка 14), который по своему фазовому составу соответствует фазам клинкера (рис. 2): 66,5 масс. % CaO; 9,5 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 19 масс. % SiO<sub>2</sub>; 5 масс. % MgO.

Относительно этого состава была построена новая, более узкая область проведения следующей серии опытов (рис. 3).

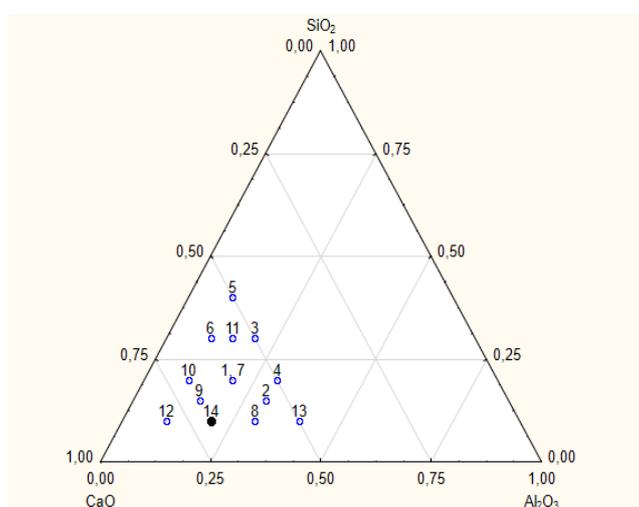


Рисунок 2 – Область первой экспериментальной проверки

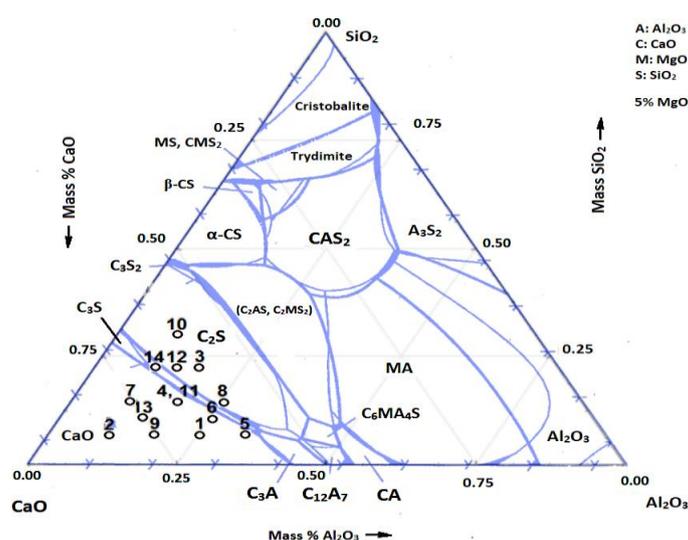


Рисунок 3 – Область проведения во втором шаге эксперимента, нанесённая на диаграмму CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> при 5 % содержания MgO

Область разбита симплекс-решетчатый планированием на 14 точек с шагом в 3,83 масс. % по содержанию CaO, SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при постоянном содержании MgO в 5 масс. % вокруг оптимального состава, полученного в предыдущей итерации.

Путем расчётов по полимерной модели строения шлаков с учётом полученных условий в 1540-1560 °С температурного режима, показано, что точки №№ 3, 5, 7, 8, 10, 12 удовлетворяют требованиям по содержанию твёрдых частиц в жидкости и жидкоподвижности. На этом основании была смоделирована и рассчитана новая, ещё более узкая, финальная область проведения экспериментальной проверки (рис. 4, табл. 1).

На этом этапе в смеси из чистых реагентов добавлялось боратное стекло, содержащее в себе 8,88 % В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от общей массы, чтобы скорректировать стабилизацию шлака в нужном для исследования направлении. Стекло вводилось в смеси в количестве от 0,02 до 2,4 % от общей массы составов. Полученные расчётные данные по этой области указали на то, что каждый состав, обозначенный точкой, получается жидкоподвижным, содержит минимум свободных твёрдых частиц, что говорит о простоте разделения металлической и силикатной фаз состава. Кроме того, отмечено, что составы обладают фазами, соответствующими цементному клинкеру, что также было экспериментально исследовано.

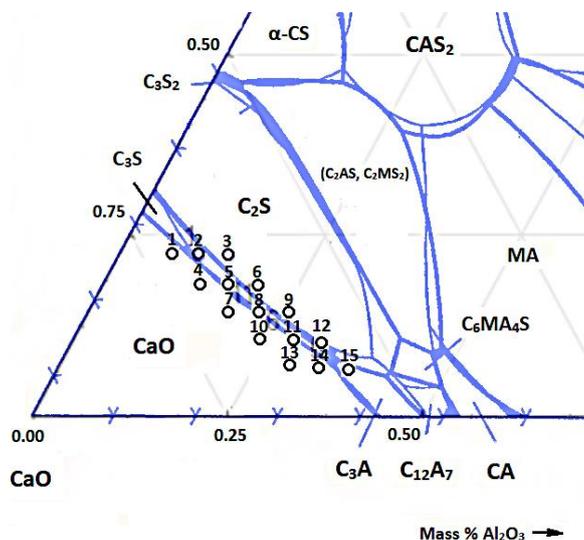


Рисунок 4 – Финальная область проведения эксперимента, нанесённая на диаграмму CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> при 5 % содержания MgO

Таблица 1 – Химический состав шлаковых смесей для финальной итерации эксперимента

№ смеси	Состав смеси, масс. %					Вязкость, Па·С		Сумма $C_3S$ , $\beta$ - $C_2S$ и $C_3A$ , %
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Боратное стекло	Расчетная	Измеренная	
3.2.2.1	67,01	5,25	19,29	5,00	3,69	0,088	0,105	70,23
3.2.2.2	63,69	9,10	19,96	5,00	2,40	0,115	1,703	62,21
3.2.2.3	60,28	12,90	20,45	5,00	1,46	0,139	0,101	74,97
3.2.2.4	65,64	11,01	16,59	5,00	1,89	0,138	0,117	64,31
3.2.2.5	62,19	14,78	17,00	5,00	1,11	0,170	0,216	88,33
3.2.2.6	58,68	18,51	17,27	5,00	0,59	0,198	0,265	74,39
3.2.2.7	64,08	16,65	13,50	5,00	0,82	0,218	0,189	55,25
3.2.2.8	60,54	20,36	13,72	5,00	0,41	0,254	0,110	85,23
3.2.2.9	56,96	24,04	13,84	5,00	0,17	0,287	0,827	70,23
3.2.2.10	60,60	24,04	10,20	5,00	0,17	0,368	0,135	65,22
3.2.2.11	56,98	27,70	10,26	5,00	0,06	0,406	0,122	64,80
3.2.2.12	53,35	31,35	10,28	5,00	0,02	0,440	0,403	75,93
3.2.2.13	60,63	27,70	6,62	5,00	0,06	0,567	0,248	66,28
3.2.2.14	56,99	31,35	6,64	5,00	0,02	0,603	0,469	83,34
3.2.2.15	53,35	34,99	6,64	5,00	0,02	0,634	0,862	77,22

По этой итерации опытов показано, что полученные в ходе опытов шлаки №№ 5, 6, 8 и 14 обладают стабильной кусковостью, низкой вязкостью, хорошей жидкоподвижностью, и по итогу обладают фазами, соответствующими цементному клинкеру:

– состав А: 62,19 масс. % CaO, 14,78 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 17,00 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 1,11 масс. % боратного стекла;

– состав Б: 58,68 масс. % CaO, 18,51 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 17,27 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 0,59 масс. % боратного стекла;

– состав В: 60,54 масс. % CaO, 20,36 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13,72 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 0,41 масс. % боратного стекла;

– состав Г: 56,99 масс. % CaO, 31,35 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6,64 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 0,02 масс. % боратного стекла.

Состав, полученный в ходе первой итерации эксперимента, также обладает также хорошей жидкоподвижностью, низкой вязкостью и стабильной кусковостью. Т. о., установлены пять составов шихтовки, включающие в себя шлаки АКП, ДСП, известь и боратное стекло, позволяющие полностью их утилизировать и получить портландцементный клинкер (рис. 5).

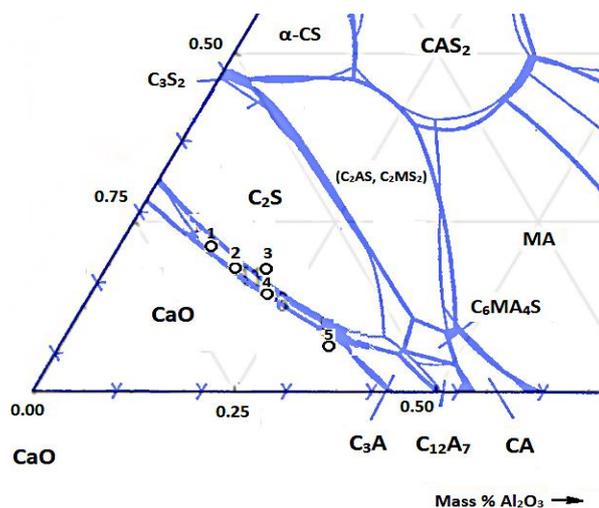


Рисунок 5 – Визуальное отображение конечных составов шлака для получения клинкера и чугуна

Следующим этапом стала проверка возможности получения одновременно клинкера и чугуна, соответствующих требованиям ГОСТ из реальных шлаковых отходов. Для этого был отобран состав имеющихся АКП и ДСП шлаков с ПАО «Северский трубный завод». Проведение лабораторных экспериментов проведено по разработанной методике с совместным помолом представленных шлаков, извести и боратного стекла в соответствии с выявленными составами шихты для клинкера, соблюдением температурного режима и последующим медленным охлаждением.

Чтобы получить чугун, необходимо восстанавливать его углеродистым восстановителем, которым в промышленных условиях является кокс. Ввиду того, что в используемом шлаке находится исключительно оксид FeO, восстановление железа было рассчитано с помощью программы HSC Chemistry 6.0 по реакции (1):



Расчётным путем определено, что на 1 % FeO приходится 0,167 % углеродистого восстановителя. Данное положение учитывалось при расчете необходимого кокса для восстановления железа из смеси, содержащей шлаки АКП и ДСП.

Лабораторные опыты подтвердили возможность одновременного получения портландцементного клинкера и чугуна. В результатах экспериментов оптимальный шлак образовался со значительным количеством шлака ДСП относительно шлака АКП. При противоположной картине не образуются необходимые фазы шлакового состава. Это связано с тем, что через фазы шлака ДСП при высокотемпературном превращении проходит следующая цепочкой фазовых переходов (2) и (3), позволяющая получить конечные фазы клинкера ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ):



Для получения клинкера, полностью соответствующего требованиям ГОСТ, был проведен экспериментальный синтез портландцементного клинкера и чугуна. Синтез проводился по той же лабораторной схеме опытов путём добавки пыли ДСП во время завершающих этапов опытов, для того, чтобы сформировать фазы клинкера, содержащие оксиды железа. Однако на этом этапе был получен иной результат: оксиды железа, введенные в шлак вместе с пылью ДСП, успели восстановиться, и в итоге полученный клинкер удовлетворял требованиям ГОСТ. Аналогично удовлетворял требованиям ГОСТ и полученный чугун (табл. 2). Следует добавить, что конечный состав получаемого чугуна зависит от содержания оксидов железа в шлаке ДСП. В условиях проведения экспериментов выход данных продуктов составил: шлак (клинкер) 82,0 масс. %, чугун 18,0 масс. %.

Таким образом, на данном этапе были подтверждены составы смесей, из которых получается и портландцементный клинкер и передельный чугун, при учёте добавки, содержащей оксиды железа (табл. 3). Оба полученных продукта

в опытах соответствуют требованиям ГОСТ, что говорит об успешной совместной утилизации исходных материалов, вовлеченных в этот процесс.

Таблица 2 – Химический состав полученного чугуна

Продукт	Содержание в чугуне, масс. %				
	C	Mn	Si	P	S
Чугун	3,13	1,26	0,109	0,036	0,021

Таблица 3 – Конечные составы шлаков для получения ПЦ клинкера и чугуна

№ смеси	Состав смеси, масс. %					Сумма $C_3S$ , $\beta$ - $C_2S$ и $C_3A$ , %
	CaO	$Al_2O_3$	$SiO_2$	MgO	Боратное стекло	
1	66,50	9,50	19,00	5,00	0,00	83,00
2	62,19	14,78	17,00	5,00	1,11	88,33
3	58,68	18,51	17,27	5,00	0,59	74,39
4	60,54	20,36	13,72	5,00	0,41	85,23
5	56,99	31,35	6,64	5,00	0,02	83,34

Исследование показало возможность реализации следующей технологической цепочки: совместный помол шлаковых компонентов вместе с добавкой извести, кокса и боратного стекла в расчётном количестве, полученном в ходе данного исследования. Плавление полученной смеси до температур 1540-1560 °С, с выдержкой в 10 минут, добавление пыли ДСП на финальном этапе для формирования металлического остатка.

При использовании предлагаемой шихтовки и соблюдении технологического процесса получают два товарных продукта – передельный чугун и портландцементный клинкер. В результате реализуемой технологии не образуется отходов, что обеспечивает полную утилизацию шлаков.

Исходя из проведенной работы на этом этапе, было разработано предложение по шихтовке из имеющихся отвальных шлаков конкретных составов для плавки на сталеплавильных предприятиях. Шихтовка должна проводиться таким образом, чтобы получать шлаки обозначенных составов и

металлический остаток. Необходимо соблюдение температурного режима плавки и восстановительных условий.

**В четвертой главе** приводятся результаты промышленных испытаний, представлена цельная технологическая цепочка и экономическое обоснование разработанной технологии.

Испытания предложенной технологии были проведены на опытном производстве ПАО «Ключевский завод ферросплавов» с целью отработки данной технологии и получению двух товарных продуктов. Проведение испытаний протекало по технологии, описанной выше. После охлаждения, продукты плавки разделялись на чугун и шлак. Продукты плавки получены в следующем процентном соотношении: чугун ~ 20 %; шлаковый клинкер ~ 80 %. Состав шихты первой плавки совпадал с составом шихты плавки, реализованной в лабораторных условиях (табл. 4).

Таблица 4 – Состав шихты для плавки

Наименование компонента шихты	Содержание в шихте					
	масс. %			кг		
Номер плавки	1	2	3	1	2	3
Шлак ДСП	60,0	63,0	60	30,0	31,5	30
Шлак АКП	20,0	20,0	20	10,0	10	10
Известь (пыль циклонов)	20,0	17,0	20	10,0	8,5	10
Коксик (сверх 100 %)	10,0	3,5	19,2	5,0	1,75	9,6
Окалина (сверх 100%)	-	3,0	50	-	1,5	50

Полученный чугун плавки № 1 и № 3 соответствует требованиям ГОСТ 805 «Чугун передельный. Технические условия» к марке ПЛ1». Полученный в результате каждой из плавки клинкер соответствовал требованиям ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные. Технические условия». Данные результаты подтверждают возможность получения предлагаемым способом одновременно чугуна и портландцементного клинкера.

Однако, представленный способ технологии выходит достаточно дорогим и имеется большой риск получить карбиды из-за перегрева на руднотермической печи (РТП), ввиду чего был произведен поиск подходящего агрегата и по

технологическому режиму, и по дешевизне. Таким агрегатом является роторно-наклонная печь (РНП). Одним из несомненных достоинств РНП по сравнению с РТП является то, что температурный режим в указанной печи управляем, отличие от дуговой печи. Приведена схема для реализации технологии на роторно-наклонной печи (рис. 6).

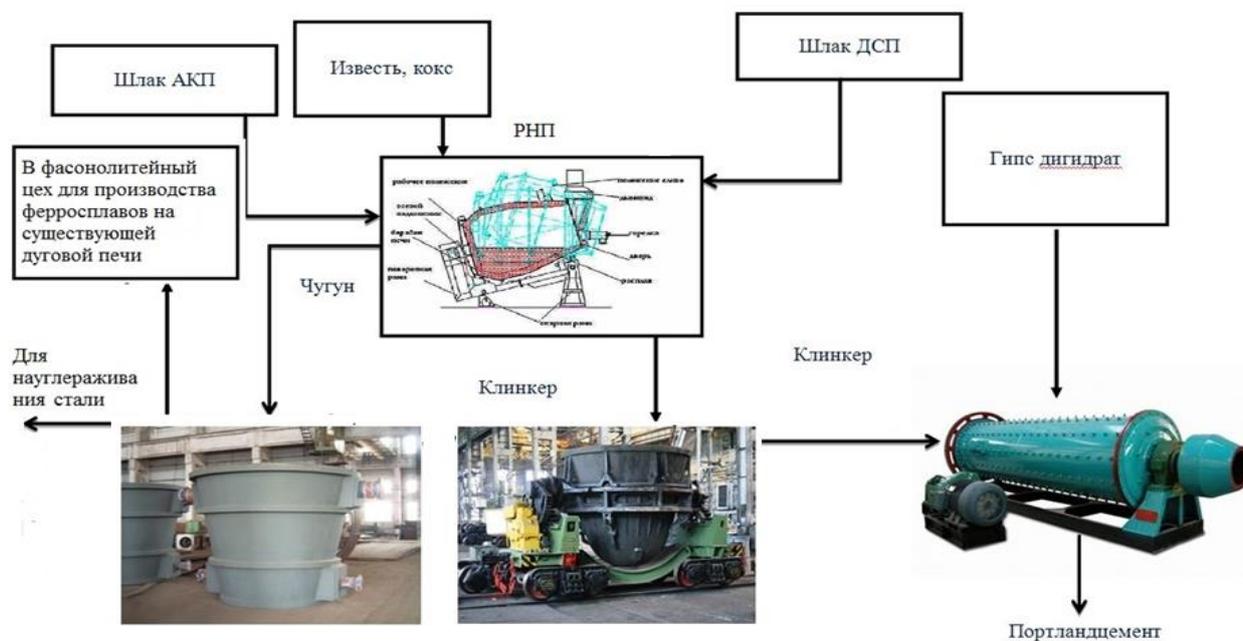


Рисунок 6 – Возможная схема переработки шлаков АКП и ДСП с получением товарных продуктов

Суть технологии заключается в том, что шлаки АКП и ДСП смешиваются вместе с известью в тех же процентных соотношениях составов, которые были получены в ходе исследования. После смешения смеси подаются в роторно-наклонную печь, где происходят процессы восстановления и плавления, после чего, готовый металл (чугун) сливается в ковш для дальнейшей обработки, а полученный шлаковый остаток (клинкер), подаётся дальше на его доработку до портландцемента, где предварительно смешивается с гипсовым дигидратом.

В главе приводится сравнительный экономический расчёт, демонстрирующий что реализация способа переработки с получением чугуна и клинкера наилучшим образом реализуема на роторно-наклонных печах (табл. 5).

Условно годовая экономия составила при реализации РНП способа по сравнению с РТП составляет порядка 29 млн руб. экономии. В ином случае

экономии не случается, а годовой эффект составляет точно такую же, но отрицательную величину, что говорит о неэффективности использования РТП по сравнению с РНП. Также при реализации продаж исключительно клинкера при его стоимости в 4100 руб./т на РНП, годовой объем выручки составит 102 млн руб., а маржинальный доход 68 млн руб., что при всех прочих показателях почти в 2 раза меньше маржинального дохода от сбыта на РТП (39 млн руб.). Срок окупаемости на РНП составляет 2 месяца, на РТП – 4 месяца, что говорит об экономической выгоде использования роторно-наклонных печей.

Таблица 5 – Расчёт сравнительной эффективности

Наименование	РТП	РНП.
Приведенные затраты, млн. руб.	1163100,6	773669,4
Годовой эффект, млн. руб.	-389431	389431
Условно годовая экономия, млн. руб.	29431	-29431

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа литературных источников показано, что существующие способы утилизации конвертерных и электропечных шлаков, обеспечивают их переработку в стройматериалы и при этом остаётся не переработанной металлическая часть, либо обеспечивают восстановление оксидов железа, но силикатная часть шлаков при этом перерабатывается не полностью. Также показано, что подобная ситуация и с рафинировочным шлаком – в ряде случаев путем его стабилизации перерабатывается силикатная часть и не утилизируются остатки оксидов железа, а в ряде случаев отечественной практики при утилизации извлекается металл, но остается распадающаяся силикатная часть.

В данной работе предложен новый подход в совместной переработке ковшевого и электропечного шлака, заключающийся в:

– определении оптимальной области шлаковых составов по анализу шлаковых диаграммам для получения как передельного чугуна, так и портландцементного клинкера из имеющихся шлаковых материалов;

– соответственном подборе составов для экспериментальных исследований, заключающихся в восстановительном нагреве и последующем медленном охлаждении, с замерах температуры и вязкости;

– оценке, сравнении и анализе расчётов вязкости гетерогенных шлаков по полимерной модели строения шлаков и экспериментальными данными;

– построении по полученным результатам химических областей на шлаковых диаграммах, пригодных для переработки представленных отходов таким образом, чтобы их полностью утилизировать и получить качественные товарные продукты;

– определении конечных химических составов шихты для получения из шлаковых отходов портландцементного клинкера и передельного чугуна.

Представлена методика экспериментального исследования, позволяющая оценить конкретные результаты взаимовлияния различных компонентов шлака на образование различных фаз, которые могут, как соответствовать, так и не соответствовать составам портландцементного клинкера. В ходе экспериментального исследования была подтверждена возможность одновременного получения чугуна и шлакового клинкера на основе модельного шлака, соответствующего смеси ковшевого и электропечного шлаков с известью в различных соотношениях. Обозначена область шлаковых составов, из которых точно получается цементный клинкер и чугун. Уточнены конкретные составы для получения портландцементного клинкера и чугуна:

– состав А: 66,50 масс. % CaO, 9,50 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10,00 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 0,00 масс. % боратного стекла;

– состав Б: 62,19 масс. % CaO, 14,78 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 17,00 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 1,11 масс. % боратного стекла;

– состав В: 58,68 масс. % CaO, 18,51 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 17,27 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 0,59 масс. % боратного стекла;

– состав Г: 60,54 масс. % CaO, 20,36 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13,72 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 0,41 масс. % боратного стекла;

– состав Д: 56,99 масс. % CaO, 31,35 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6,64 масс. % SiO<sub>2</sub>, 5,00 масс. % MgO и 0,02 масс. % боратного стекла.

Представленные составы были получены в ходе соответствия следующего технологического режима: подготовка шихты в соответствии с выявленными составами для получения чугуна и клинкера, её совместный помол и перемешивание, загрузка в тигель, плавка в восстановительной среде до достижения температуры 1540-1560 °С, последующее медленное охлаждение полученных продуктов.

Дальнейшее исследование подтвердило возможность получения двух товарных продуктов на основе оригинальных шлаков АКП и ДСП с металлургического предприятия. Результаты подтвердили однозначные составы (А-Д) шихты для получения портландцементного клинкера и чугуна, на основании чего разработан способ получения этих товарных продуктов из имеющихся отходов материалов на основе роторно-наклонной печи.

Проведенные промышленные испытания показали, что:

– разработанный способ получения чугуна и клинкера из шлака ДСП, АКП и извести показал положительные результаты, подтверждающие возможность реализации его в промышленности;

– наилучшим решением для реализации данной технологии являются роторно-наклонные печи, наиболее экономически выгодные и эффективные в реализации разработанного способа.

Экономические расчёты показывают, как выгоду, так и эффективность использования роторно-наклонных печей по сравнению с руднотермическими. Применение безотходной технологии на роторно-наклонных печах приведёт к однозначному получению передельного чугуна и портландцементного клинкера, соответствующих требованиям нормативных документов по принципу получения, показанному лабораторным и промышленным путями.

Проведенная работа подтверждает возможность безотходной переработки сразу двух видов шлаковых отходов - ковшевого и электропечного шлака. Исследование этой возможности привело к открытию определенных химических составов шихтовки этих шлаков с известью и отходами производства боратного стекла, что приводит к получению в переработке ценных товарных продуктов -

передельного чугуна марки ПЛ1 и портландцементного клинкера, который соответствует требованиям ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные». Полученные результаты подтверждаются актами испытания у соответствующего предприятия. В работе также представлена технологическая схема переработки отходов на роторно-наклонной печи и дано экономическое обоснование для внедрения в промышленность.

### **Рекомендации для дальнейшего применения результатов работы**

Разработанная технология экономически эффективно может быть применена на металлургических предприятиях, которые складывают в отвалах шлаки АКП, ДСП. Она позволит продуктивно перерабатывать шлаки, не получая от них остаток. На предприятиях рекомендуется организовать цех или участок под предлагаемую технологию для эффективной утилизации имеющихся шлаков.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих печатных работах:**

*В научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Mikheenkov, M. A. Production of mineral binder from steel-smelting slag / M.A. Mikheenkov, O.Yu. Sheshukov, I.V. Nekrasov, D.K. Egiazaryan, D. A. Lobanov // *Steel in Translation*. – 2016. – V. 46. – № 3. – P. 232-235.
2. Sheshukov, O. Yu. Stabilization of Refining Slag by Adjusting Its Phase Composition and Giving It the Properties of Mineral Binders / O.Yu. Sheshukov, M.A. Mikheenkov, I.V. Nekrasov, D.K. Egiazaryan, D.A. Lobanov // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2017. – V. 58. – № 3. – P. 324-330.
3. Sheshukov, O. Yu. The opportunity of silicate product manufacturing with simultaneous pig iron reduction from slag technogenic formations / O.Yu. Sheshukov, M.A. Mikheenkov, D.A. Lobanov, I.V. Nekrasov, D.K. Egiazaryan // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – 1886(1) – P. 2-9.
4. Mikheenkov, M. A. Reduction of environmental pressure by giving cementing material properties to the ferrous slags / M.A. Mikheenkov, O.Yu. Sheshukov, D.A. Lobanov // *KnE Materials Science*. – 2017. – P. 65-69.
5. Sheshukov, O. Yu. Chemical stabilization features of ladle furnace slag in ferrous metallurgy / O.Yu. Sheshukov, M.A. Mikheenkov, D.K. Egiazaryan, L.A. Ovchinnikova, D.A. Lobanov // *KnE Materials Science*. – 2017. – P. 59-64.

6. Mikheenkov, M. A. Slag technogenic formations as a material for the production of silicate products and pig iron / M.A. Mikheenkov, O.Yu. Sheshukov, D.A. Lobanov // Solid State Phenomena. – 2018. – Т. 284 SSP. – P. 1119-1126.

*В других изданиях:*

7. Шешуков, О. Ю. Изучение вяжущих свойств сталеплавильных шлаков / О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, М.А. Михеенков, Д.К. Егиазарьян, Л.А. Овчинникова, Д.А. Лобанов, А.П. Крылов // Материалы XVI Международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали», 05-09 октября, 2015. – Магнитогорск, 2015. – С. 66-69.

8. Лобанов, Д. А. Разработка технологических основ стабилизации шлаков АКП и повышения их рафинирующих свойств / Д.А. Лобанов, Д.К. Егиазарьян, О.Ю. Шешуков // Сборник научных трудов Всероссийской междисциплинарной молодежной конференции с международным участием «V Информационная школа молодого ученого», 30 ноября – 03 декабря, 2015. – Екатеринбург, 2015. – С. 325-332.

9. Михеенков, М. А. Изучение влияния фазового состава рафинировочного шлака на стойкость футеровки агрегата «ковш-печь» / М.А. Михеенков, О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, Д.К. Егиазарьян, Л.А. Овчинникова, Д.А. Лобанов, Л.А. Маршук // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2015. – Т. 1. – С. 168-171.

10. Шешуков, О. Ю. Технологические особенности комплексной переработки шлаков сталеплавильной отрасли в товарные продукты / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, И.В. Некрасов, Д.К. Егиазарьян, Д.А. Лобанов, Л.А. Овчинникова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2017. – Т. 1. – С. 87-90.

11. Шешуков, О. Ю. Снижение нагрузки на окружающую среду за счет придания шлакам черной металлургии свойств минеральных вяжущих веществ / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, Д.А. Лобанов // Труды Конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований», 05-09 июня, 2017. – Екатеринбург, 2017. – С. 157-159.

12. Шешуков, О. Ю. Физико-химические основы переработки железосодержащих техногенных отходов и некондиционных руд / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, И.В. Некрасов, Д.К. Егиазарьян, Д.А. Лобанов // Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 115-летию

со дня рождения академика А.М. Самарина «Физико-химические основы металлургических процессов», 14-15 ноября, 2017. – Москва, 2017. – С. 32.

13. Михеенков, М. А. Шлаковые техногенные образования как материал для получения силикатных товарных продуктов и чугуна / М.А. Михеенков, О.Ю. Шешуков, Д.А. Лобанов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т. 6. – №. 1. – С. 46-51.

14. Лобанов, Д. А. Особенности формирования шлаков черной металлургии и возможные пути улучшения технологии металлургического передела и комплексной переработки шлаков / Д.А. Лобанов, М.А. Михеенков, О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, Д.К. Егиазарьян, Л.А. Овчинникова, А.А. Метёлкин // Сборник трудов XV Международного конгресса сталеплавильщиков, 15-19 октября, 2018. – Тула, 2018. – С. 462-467.

15. Sheshukov, O. Yu. Correction of the metallurgical slag phase composition in the process of reduction roasting / O.Yu. Sheshukov, M.A. Mikheenkov, I.V. Nekrasov, D.K. Egiazaryan, D.A. Lobanov // Book of Abstracts of the 16<sup>th</sup> IUPAC High Temperature Material Chemistry Conference (НТМС-ХVI), 02-06 июля, 2018. – Екатеринбург, 2018. – Р. 183.

16. Шешуков, О. Ю. Совместная переработка ковшевого и электропечного шлака: основы безотходной технологии / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, И.В. Некрасов, Д.К. Егиазарьян, Д.А. Лобанов // Сборник статей VII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации», 18-22 мая, 2020. – Екатеринбург, 2020. – С. 173-184.

17. Пат. 2722946 Российская Федерация, МПК С22В 1/16. Шихта для производства железорудного материала / В.В. Темников, Е.Г. Калимулина, П.А. Жажигаев, К.В. Миронов, О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, А.А. Метелкин, Д.А. Лобанов, Е.С. Баранов, А.Л. Мамонов, М.В. Савельев, А.А. Форшев; заявитель и патентообладатель: Акционерное общество «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ НТМК») (RU), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ») (RU). – № 2019127852; заявл. 04.09.2019; опубл. 05.06.2020, Бюл. № 16. – 8 с.

