

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

**Рязанова Андрея Геннадьевича**

«Технологические основы микроволнового прокаливания цинксодержащих материалов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 (05.16.02) – Metallургия черных, цветных и редких металлов

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время одной из наиболее важных проблем современного общества является забота об экологии планеты, которая выводит на ключевые позиции необходимость не только снижать выбросы парниковых газов и переходить на альтернативные виды топлива, но также и вовлекать в переработку ранее произведенную продукцию или иные отходы металлургических производств. В металлургии цинка наиболее распространенным способом переработки, в том числе и вторичного сырья, является процесс вельцевания, в результате которого получается продукт – вельц-окись. Значительное количество хлоридов и фторидов, содержащихся в вельц-окиси, может приводить к критическим нарушениям последующих переделов производства цинка, в частности электролиза, вплоть до полной остановки производства. Существующие способы удаления хлоридов и фторидов имеют свои недостатки. Предлагаемые соискателем направления диссертационной работы позволяют повысить экономическую и экологическую эффективность стадии удаления галогенидов нетривиальным способом – прокалкой под действием электромагнитного излучения сверхвысокой частоты, поэтому актуальность темы не вызывает сомнений и имеет научное и практическое значение.

### **Научная новизна**

Безусловным достоинством работы, имеющей все признаки научной новизны, является разработка и реализация лабораторной установки, использующей электромагнитное излучение сверхвысоких частот в качестве

источника нагрева отдельных компонентов шихты. В лаборатории проведены исследования по выявлению частотных зависимостей диэлектрической проницаемости для рассматриваемых в работе цинксодержащих веществ.

В ходе работы установлены удельные скорости нагрева исследуемых веществ, как модельных смесей, так и промышленной пробы вельц-окси. Экспериментально проведено исследование по удалению галогенидов из цинксодержащих материалов, определены оптимальные параметры процесса и показатели извлечения возгонов в газовую фазу.

Необходимо отметить, что соискателем выполнен большой объем работы по разработке методики исследования, термодинамическому и кинетическому моделированию, экспериментальному исследованию твердофазных, жидкофазных и газообразных процессов. Проведенный термодинамический анализ химических превращений в цинксодержащих материалах выполнен для многокомпонентной системы, состоящей из 12 элементов. Особый интерес в настоящей работе представляют данные по оценке кинетических закономерностей процесса удаления примесей из вельц-окси. В работе было установлено, что анализируемый процесс соответствует и наиболее полно описывается уравнением Яндера, которое в свою очередь отвечает протеканию процесса в диффузионном режиме.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Большая энергоэффективность процесса нагрева электромагнитным излучением сверхвысокой частоты позволяет сделать заключение о важных технологических параметрах, которые могут быть использованы в промышленности. Применение энергоэффективных процессов всегда было и остается важной практической задачей в металлургии. Важным эффектом предлагаемого метода является исключение выбросов углекислого газа  $\text{CO}_2$ , что дополняет энергоэффективную технологию фактором снижения «углеродного следа».

## **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Основные защищаемые положения работы подтверждены многочисленными термодинамическими и кинетическими расчетами, а также значительным количеством экспериментальных исследований процессов, протекающих при обработке цинкосодержащего материала.

Достоверность результатов диссертации и обоснованность сделанных выводов обеспечивается использованием современных теоретических представлений и экспериментальных методов при получении и интерпретации результатов, включающих широкий спектр различных методов анализа и используемого оборудования. Работа оформлена и написана понятным и современным научным языком.

**Диссертация состоит из** введения, трёх глав и заключения, содержит 47 таблиц и 61 рисунок, изложена на 160 страницах, список использованных источников включает 120 наименований. **Содержание диссертации** полно отражено в тексте автореферата.

*Во введении* раскрыта актуальность работы по теме диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи, рассмотрены научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

*Первая глава* раскрывает текущую ситуацию в мировом производстве цинка из вторичного сырья, а также рудных сырьевых запасов. Представлена информация о том, что мировое развитие приводит к необходимости переработки вторичного сырья. При этом переработка вторичного сырья сопровождается необходимостью удаления примесных элементов из него. Даны характеристики имеющихся технологий по удалению примесей, обоснованы их недостатки и предложен новый метод обработки материалов электромагнитным излучением сверхвысокой частоты.

*Вторая глава* посвящена методикам работы на опытно-лабораторной установке, дана информация об оснащении лабораторной установки для выполнения поставленных в диссертации задач. Приведены химические и

фазовые составы промышленных образцов вельц-окси, которая получена на действующем производстве.

Третья глава описывает результаты термодинамического и кинетического анализов нагрева модельных образцов и промышленного образца вельц-окси. Термодинамическое моделирование выполнено в среде современного программного обеспечения HSC Chemistry. Результаты моделирования достаточно полно раскрывают картину протекающих химических реакций в процессе прокаливания. В главе достаточно широко приведены кинетические кривые по нагреву модельных смесей с различным содержанием хлорида цинка, оксида цинка и хлорида свинца, промышленного образца вельц-окси. Результаты позволили определить оптимальную массу образцов 30 грамм для проведения исследований на разработанной установке. В исследованиях по эффективности удаления хлоридов из модельных смесей и промышленного образца вельц-окси изучено влияние технологических параметров: мощность установки, температура, длительность и влажность. Установлено, что при температуре 1000 °С и времени выдержки 600 с остаточное содержание хлорид-иона в прокалённой вельц-окси не превышает 0,04 мас.%, что соответствует переводу в газовую фазу не менее 96,4 % от его исходного количества. Экспериментально изучены кинетические закономерности эффективности удаления хлорид-иона из промышленного образца вельц-окси. Процесс описывается уравнением Яндера, что соответствует его протеканию в условиях диффузионных затруднений. Кажущаяся энергия активации составляет 66,3 кДж/моль. На основании результатов проведенных исследований разработана технологическая схема микроволнового прокаливания вельц-окси и даны рекомендации по применению метода микроволнового прокаливания в промышленности.

Полученные автором результаты могут послужить хорошим стимулом для дальнейших научных исследований в этой области.

Работа прошла серьезную апробацию, ее результаты доложены на 6-ти конференциях, в том числе и международного уровня. Материалы соискателя представлены в 7 научных публикациях, 5 из которых представлены ведущими

научными журналами, рекомендованными ВАК или входящими в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

### **Замечания, рекомендации и выводы по работе**

По представленной работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. В качестве основного метода исследования вещества выступает РСМА, при этом стоит отметить, что несмотря на большое количество достоинств, данный метод относится к локальным методам исследования и полученные результаты среднего состава могут существенно отличаться от среднего состава пробы. Также отметим, что определение массовой доли вещества менее 0,05 % достаточно трудоемко и проблематично, кроме того, обязательным требованием к образцам будет являться изготовление шлифов и применения напыления, в работе методика приготовления не описана. Каким образом производилась подготовка образцов к исследованию? Также, каким образом, в таблице 1 “Химический состав опытного образца вельц-окси” определялись концентрации с точностью до сотых, а для фтора и тысячных процента, в отсутствии аналитических методов анализа?

2. В диссертации соискателя упоминается применение растрового электронного микроскопа, который позволяет получить изображение микроструктуры исследуемого вещества, однако в работе подобных данных обнаружено не было. Подобные материалы могли бы существенно обогатить настоящую работу и показать наглядно изменение фазового состава после пирометаллургической обработки.

3. Производилось ли исследование возгонов в настоящей работе или показатели удаления компонентов определялись по разности исходного материала и полученных продуктов?

4. При расчете теплового баланса значительной статьей расхода являются тепловые потери, т.е. расход тепла на нагрев тигля, минеральной ваты и термпары (46,1 отн.%), а на непосредственный нагрев вещества, продуктов и прочие тепловые процессы 16,9 отн.%. Основным критерием определения теплотерь с печью, тиглем и каолиновой ватой являются конечные и

начальные температуры рассматриваемых объектов. Проводились ли инструментальные замеры температуры и насколько корректны представленные в расчетах коэффициенты теплопередачи для рассматриваемых условий?

5. Корректно ли при расчете теплового баланса для статьи возгоны принимать температуру возгонов как среднее арифметическое между температурами кипения хлоридов цинка и свинца?

6. Производилась ли оценка теплового баланса предполагаемой промышленной установки и производилось ли ее сравнение с существующими пирометаллургическими технологиями?

7. Предлагаемый процесс напоминает агломерационный обжиг сульфидных или углеродсодержащих руд, где завершение процесса обусловлено существенным сокращением доли серы или углерода в обжигаемом веществе, технологическое оформление также подразумевает использование в основе агломерационной машины. Хлориды в исследуемом веществе являются аналогом серы или углерода, как основного источника поглощения электромагнитного излучения и превращения его в тепловую энергию, следует ли ожидать при длительной выдержке прекращение поглощения электромагнитного излучения и снижение температуры обрабатываемого объекта после удаления всего объема или значительной части электромагнитовосприимчивых компонентов?

8. В работе на странице 129 сообщается о том, что при температурах выше  $300^{\circ}\text{C}$  часть оксидов металлов становятся электромагнитовосприимчивыми. О каких оксидах идет речь? Проводилось ли сравнение электромагнитной восприимчивости чистых оксидов металлов и участвующих в процессе хлоридов.

### **Общее заключение**

Сделанные замечания ни в коей мере не умаляют основных достоинств диссертационной работы автора. Диссертационная работа Рязанова Андрея Геннадьевича «Технологические основы микроволнового прокаливания

цинксодержащих материалов» является законченной научно-квалификационной работой и полностью соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 в ред. от 01.10.2018 г., с изм. от 26.05.2020 г. «О порядке присуждения учёных степеней»), предъявляемым к кандидатским диссертациям, поскольку в ней предложено решение задач, имеющих существенное значение в области переработки вторичного сырья цинксодержащих материалов. Автор диссертации Рязанов Андрей Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 (05.16.02) – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент

Пахомов Роман Александрович  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории  
пирометаллургии департамента по исследованиям и разработкам Общества с  
ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель»

195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, д.11  
Телефон: +7 (950) 021-13-77,  
e-mail: pakhomovra@gmail.com

Подпись Пахомова Р.А. заверяю.  
Вед. специалист ОРП



Платонова М.В.  
01.12.2021

Я, Пахомов Роман Александрович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе 