

На правах рукописи



Алпатова Анна Андреевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ДУГОВОМ  
НАГРЕВЕ МЕТАЛЛА И СВОЙСТВ ПЫЛИ С ЦЕЛЬЮ ЕЁ УТИЛИЗАЦИИ

Специальность 05.16.07 – «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2016

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Металлургия стали и ферросплавов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

### **Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор, **Симонян Лаура Михайловна**  
профессор кафедры «Металлургия стали,  
новые производственные технологии и  
защита металлов»  
ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС»

### **Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор

**Еланский Геннадий Николаевич**

кандидат технических наук, ведущий аналитик  
дирекции по маркетингу и стратегии  
АО «Объединённая  
металлургическая компания»

**Голубев Олег Валентинович**

### **Ведущее предприятие:**

**Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Центральный научно-  
исследовательский институт черной  
металлургии им. И.П. Бардина»**

Защита диссертации состоится «24» ноября 2016 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.02 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский пр., д. 6, аудитория А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» – <http://misis.ru>.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.132.02,  
доцент, кандидат технических наук



А.В. Колтыгин

## **1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Образование отходов в металлургии привело к возникновению техногенных месторождений. В России производится около 70 млн т стали в год, в том числе 22 млн т электростали. Образование пыли в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) может достигать до 30 кг на 1 т стали. Системами пылегазоочистки ежегодно улавливается около 650 тыс. т пыли электросталеплавильного производства, при коэффициенте очистки газа – 99 %. Необходимость снижения пылеобразования и разработки технологии утилизации пыли обусловлена негативным воздействием пыли на окружающую среду и здоровье человека.

В этих условиях необходимо найти пути снижения пылеобразования и использования пыли в качестве вторичного сырья с целью извлечения ценных компонентов, в первую очередь Fe, Zn, Pb.

В литературе отсутствует приемлемая методика количественной оценки интенсивности образования пыли в зависимости от технологических параметров. Рекомендации по оценке интенсивности пылеобразования позволят прогнозировать и контролировать пылевынос из ДСП. Изучение процессов испарения под воздействием дуг и свойств пыли позволит определить условия минимального пылеобразования, а также области использования уловленной пыли.

В настоящее время в металлургии повысился интерес к использованию вторичных ресурсов, в том числе для производства новой продукции. Особое внимание уделяется разработке способов извлечения ценных компонентов из металлургической пыли, например, цинка и свинца. Одним из высокотехнологичных процессов является переработка сталеплавильной пыли в плазменно-дуговой печи. Ключевым отличием плазменной технологии являются высокие температуры процесса (3000-8000°C), что позволяет нейтрализовать любые опасные вещества, например, диоксины и фураны.

Высокая производительность процесса извлечения цветных металлов из тонкодисперсной пыли обеспечивается быстрым достижением заданных температур и высокой скоростью процесса.

Изучение вопросов образования пыли в дуговой печи, свойств этой пыли и возможностей её утилизации представляет несомненный интерес с точки зрения снижения воздействия на окружающую среду и увеличения ресурсной базы отрасли.

### **Цель работы**

Исследование процессов испарения под воздействием дуг в электропечах для определения условий минимального пылеобразования. Изучение состава и свойств пыли для поиска путей её утилизации и использования.

### **Задачи исследования**

1. Анализ литературных данных по процессам пылеобразования в дуговых сталеплавильных печах и экспериментальное исследование испарения компонентов расплава под воздействием дуг.

2. Изучение состава, структуры и свойств электросталеплавильной пыли для поиска путей её утилизации и вторичного использования.

3. Термодинамическое моделирование процессов извлечения железа, цинка и свинца из пыли.

4. Исследование раздельного извлечения цинка и свинца из пыли с использованием плазменного нагрева в лабораторных условиях.

#### **Научная новизна**

1. Теоретически обоснованы предельные температуры как совместного, так и селективного извлечения цинка и свинца из пыли электросталеплавильного производства. Показана возможность извлечения цветных металлов из пыли без дополнительного введения восстановителя. Показана возможность селективного извлечения цинка и свинца из пыли, содержащей менее 4 % углерода.

2. Предложена зависимость для оценки количества пыли, образующейся в зоне воздействия дуг для промышленных печей, которая базируется на допустимой плотности тока.

3. Установлено, что дисперсный состав пыли электросталеплавильного производства описывается кривыми распределения, имеющими четко выраженные максимумы, которые объясняются определяющим воздействием дуги на процесс пылеобразования на начальном этапе расплавления лома и интенсивной продувки ванны кислородом и активного обезуглероживания расплава на следующих этапах.

#### **Практическая значимость**

1. Предложена технологическая схема получения порошка оксидов свинца и цинка для дальнейшего использования в различных сферах применения. (Получено свидетельство о регистрации ноу-хау № 17-338-2014 ОИС).

2. Показана возможность изготовления пленочных и волокнистых композиционных материалов на основе полиакрилонитрила (ПАН) при добавлении мелкодисперсной фракции пыли ДСП (5-10 %) для увеличения термостабильности. Предложено использование пыли электросталеплавильного производства для повышения магнитных свойств композитов, что подтверждено протоколом Научно-технического совещания НП «Научно-образовательного центра «Инновационные горные технологии»».

3. Разработаны рекомендации по изучению состава и свойств металлургической пыли на основе её элементного, вещественного и дисперсного состава, а также её морфологических характеристик. Использование рекомендаций на практике позволяет выявить области применения и возможные пути использования пыли (акт ООО «Экологический региональный центр»).

#### **Апробация работы, публикации**

Основные материалы диссертационной работы доложены на: Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», ИМЕТ РАН, Москва, 2011, 2012, 2013 г; Международной научно-практической конференции «Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе», Новокузнецк, 2010г, 2012 г, Всероссийской студенческой олимпиаде и семинаре с международным участием «Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы», Санкт-Петербург, 2011 г, 2012 г; 5<sup>th</sup> International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Dresden, 2012; Международной научной

конференции «Физико-химические основы металлургических процессов», посвященной 110-летию со дня рождения академика А.М. Самарина, Москва, 2012 г.

По материалам диссертационной работы опубликовано 13 статей, в том числе 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Получено свидетельство о регистрации ноу-хау (№ 17-338-2014 ОИС).

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Проект №14.578.21.0023 «Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий производства сложнолегированных марок сталей и сплавов с заданными свойствами для деталей и узлов авиакосмической техники». Соглашение о предоставлении субсидии № 14.578.21.0023 от «5» июня 2014 года, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0023.

### **Достоверность научных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждена применением современных методик исследования и аттестованных измерительных приборов: атомно-эмиссионный спектральный анализ (iCAP 6300); инфракрасно-абсорбционная спектроскопия (CS-230IN); рентгеновская дифракция (ДРОН 3); метод мессбауэровской спектроскопии; оптическая и сканирующая электронная микроскопия (электронный микроскоп фирмы JEOL); дифференциальный термический анализ (дериватограф Q-1500 D); термогравиметрический анализ (дериватограф Q-1500D), а также программная система для моделирования фазового и химического равновесия «Terra».

Текст диссертации и автореферат проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, изложена на 158 страницах машинописного текста и содержит 75 рисунков, 85 формул и реакций, 46 таблиц. Список литературы включает 129 источников.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы и обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Изложены цель и задачи исследования.

**В первой главе** выполнен анализ литературных данных по образованию пыли в дуговых печах, её составе, свойствах и существующих технологиях утилизации.

Удельный выход пыли при производстве стали в дуговых печах может достигать 30 кг/т стали. Образование частиц пыли при этом определяется воздействием на металлический расплав электрической дуги (27 %) и струи кислорода (60 %). Доля сыпучих материалов в процессе образования пыли составляет 13 %. Поэтому исследование процесса испарения в электропечах является актуальной задачей для определения условий минимального пылеобразования.

Анализ литературных источников показал значительные различия результатов исследований элементного и вещественного составов пыли ДСП. В пыли могут присутствовать железо - до 65 %, цинк - до 43 % и свинец - до 10 %. Данные по фракционному составу также расходятся. Это связано с тем, что формирование пыли зависит от состава шихтовых материалов, технологии и режимов выплавки стали, системы отвода пылегазовых выбросов и их улавливания. Часть мелкодисперсных жидких частиц в процессе коалесценции укрупняются в самой печи. Охлаждаясь в газоходе, они могут образовывать крупные конгломераты. Часть образовавшихся ультрадисперсных частиц выносятся из печи в газоход и конденсируются на крупных частицах, либо коагулируют, объединяясь в агрегаты и агломераты. В Российской Федерации накопление пыли ДСП составляет примерно 650 тыс. т в год. При складировании пыли наносится вред окружающей среде и теряется до, тыс. т/год: 420 железа, 280 цинка и 65 свинца.

В связи с ростом потребления цинка и свинца ведутся разработки по извлечению этих металлов из вторичного сырья. Существующие технологии извлечения цинка и свинца имеют недостатки: строгие требования к составу металлургической пыли; использование в технологии дорогостоящих шихтовых материалов (например, кокс); относительно низкая скорость процесса извлечения (производительность процесса). Целью работы является поиск путей утилизации пыли и её использования в других сферах производства.

Перспективным направлением извлечения цинка и свинца из пыли является использование плазменно-дугового нагрева. Плазменные технологии достаточно гибки к изменениям условий процесса и характеризуются надежными и управляемыми энергетическими параметрами. Преимуществом использования плазменного нагрева также является возможность исключения стадии предварительного окускования пыли и максимально полного и отдельного извлечения легкоиспаряющихся компонентов. Железосодержащую пыль, после извлечения цветных металлов, можно вернуть обратно в металлургический цикл.

В связи с этим актуальным является исследование состава и свойств пыли электросталеплавильного производства, которое позволит интерпретировать процессы её образования, а совокупность этих знаний - разработать процесс селективного разделения железа, цинка и свинца и предложить новые рациональные направления её использования.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментального исследования процессов испарения под воздействием дуг.

Для изучения процесса испарения под воздействием дуги использовали лабораторную плазменно-дуговую установку постоянного тока в дуговом режиме. Питание печи осуществляется от источника постоянного тока напряжением 220 В и мощностью 8,3 кВА. Плазматрон с выносным графитовым катодом диаметром 6 мм (рисунок 1) расположен в верхней части корпуса печи соосно с медным водоохлаждаемым тиглем (анодом). Для стабилизации дуги катод затачивали на конус, а на медный тигель соосно устанавливали экран из графита диаметром 12 мм и высотой 8 мм так, чтобы переплавляемый металл не касался его стенок.

Проведены эксперименты по изучению интенсивности испарения железа и цинка из технически чистого железа и оцинкованной стали в зависимости от силы тока и времени воздействия дугового разряда на металл. Особенностью проведенных экспериментов является то, что дуга полностью покрывала поверхность образцов, поэтому полученные в опытах результаты относятся непосредственно к зоне воздействия дугового разряда.

Объектами исследования служили образцы технического железа массой 2 г и оцинкованной стали массой 3 г, которые помещали в тигель, обеспечивая контакт с катодом (рисунок 1). Межэлектродное расстояние составляло 10-13 мм.

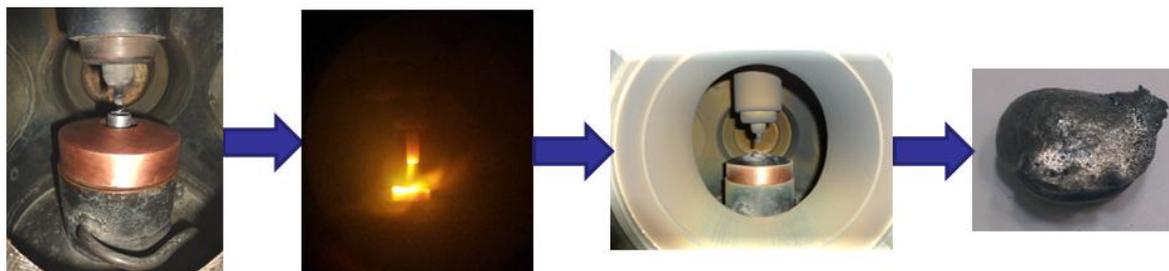


Рисунок 1- Схема проведения эксперимента

Камеру герметизировали, откачивали воздух, заполняли аргоном, включали систему водоохлаждения, источник питания, установили необходимое значение силы тока от 180 до 280 А, рабочее напряжение составляло 25-30 В. Расход аргона составлял 0,06-0,12 м<sup>3</sup>/час, давление в камере печи - 0,08-0,1 МПа, продолжительность дугового нагрева - от 5 до 150 с. За процессом плавки наблюдали через 2 смотровых окошка. Количество испарившегося железа определяли по разности массы образца до и после плавки, скорость испарения – по отношению убыли массы образца к продолжительности плавки. Пыль, осевшую на стенках камеры, собирали и анализировали.

Результаты первой серии экспериментов, полученные на образцах железа состава, %: Fe - 99,8, С - 0,036, Si - 0,007, Р - 0,003, S - 0,0029, Cu - 0,01 ( при I=177 А, U=27 В,  $l_{\text{дуг(ср)}}=11,5$  мм), представлены в таблице 1.

Удельную скорость испарения железа определяли по формуле:

$$w = \Delta m / (t \cdot S) , \quad (1)$$

где S - площадь поверхности испарения, м<sup>2</sup>.

Таблица 1 - Результаты экспериментов с образцами технически чистого железа

Параметр	Время плавки t, с			
	60	90	120	150
Масса металла m, г	2,90	2,55	2,32	1,77
Изменение массы $\Delta m$ , г	0,12	0,16	0,27	0,57
Скорость испарения, $\Delta m/t$ , г/с	0,0020	0,0018	0,0023	0,0038

Обычно активной зоной испарения является зона анодного пятна, где интенсивность испарения существенно выше, чем за его пределами. В первом приближении можно принять, что диаметр анодного пятна, т.е. активной зоны

испарения, соизмерим с диаметром катода, что справедливо для дуг с низкими значениями силы тока (рисунок 2). Для диаметра электрода, равного диаметру анодного пятна ( $6 \cdot 10^{-3}$  м), площадь анодного пятна составит  $S_{\text{ан}} = 2,83 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ .

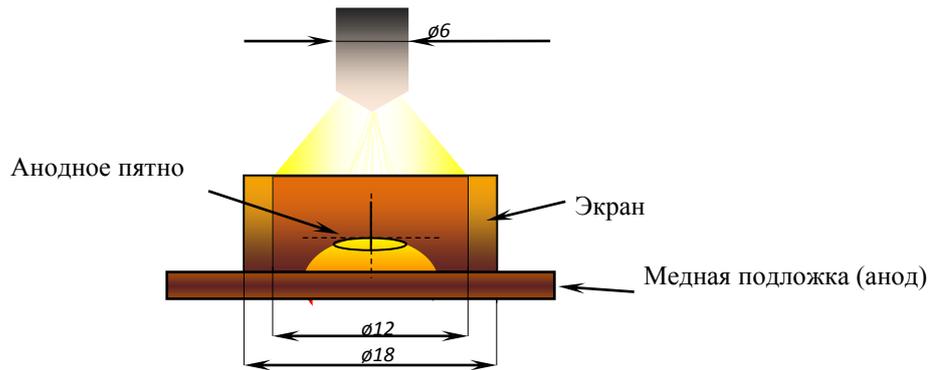


Рисунок 2 - Схема расположения образца при дуговом нагреве

Удельная скорость испарения железа в зоне анодного пятна в первой серии экспериментов составляла от 0,063 до 0,079 кг/(м<sup>2</sup>·с).

При предположении, что испарение происходит не только в зоне анодного пятна, а по всей поверхности образца ( $S_{\text{пов}} = 36 \div 49 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ), удельная скорость испарения составит 0,04-0,05 кг/(м<sup>2</sup>·с). Отношение площади анодного пятна к площади поверхности образца составляет  $S_{\text{ан}}/S_{\text{пов}} = 0,58 \div 0,79$ .

По опытным данным удельной скорости испарения железа по уравнению Ленгмюра:

$$w_{\text{ан}} = \alpha \cdot p^0 \cdot \sqrt{\frac{A}{2\pi \cdot R \cdot T}}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Ленгмюра;

$p^0$  – давление насыщенного пара элемента, Па;

$A$  – относительная атомная масса элемента, кг(кмоль);

$R$  – универсальная газовая постоянная, 8314 Дж/(К·кмоль);

$T$  – температура, К.

Для каждого эксперимента в серии была рассчитана эффективная температура поверхности расплава и температура анодного пятна:

$$\lg w = \lg \alpha + \left(9,57 - \frac{20630}{T}\right) + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{A}{2\pi \cdot R \cdot T} \quad (3)$$

Расчеты показали, что при дуговом нагреве железа в лабораторной печи при  $I=177 \text{ А}$  ( $j=6,26 \text{ А/мм}^2$ ) температура в зоне анодного пятна изменяется от 2725 К до 2851 К в зависимости от продолжительности плавки, а эффективная температура поверхности расплава - от 2655 К до 2814 К.

Температура анодного пятна зависит от плотности тока, которая определяется отношением силы тока к площади анодного пятна ( $j=I/S_{\text{ан}}$ ). Обычно, в режиме свободно горящей дуги плотность тока практически не зависит от силы тока, поскольку с увеличением силы тока диаметр и площадь сечения столба, так

же, как и размеры активных пятен, увеличиваются. В сварочных дугах эта зависимость в ряде случаев не соблюдается.

Во второй серии экспериментов изучали процесс испарения железа в зависимости от силы тока в интервале от 167 до 200 А. Продолжительность плавки была постоянной и составляла 120 с. Длина дуги составляла 13-19 мм. Результаты экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты экспериментов при изменении силы тока

Параметр	Сила тока I, А			
	167	177	187	200
Плотность тока $j$ , А/мм <sup>2</sup>	5,91	6,26	6,62	7,08
Масса металла $m \cdot 10^3$ , кг	1,94	2,28	1,65	1,77
Изменение массы $\Delta m \cdot 10^{-3}$ , кг	0,46	0,49	0,52	0,58
$w_{ан}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	0,14	0,14	0,15	0,17

Удельная скорость испарения железа в зоне анодного пятна при времени плавки  $t=120$  с составила от 0,14 до 0,17 кг/(м<sup>2</sup>·с), средняя по всей поверхности образца ( $S_{пов}=36 \div 42 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>) – от 0,10 до 0,14 кг/(м<sup>2</sup>·с). Отношение площади анодного пятна к площади поверхности образца  $S_{ан} / S_{пов}$  составляла от 0,67 до 0,83.

Во второй серии экспериментов интенсивность испарения железа выше, чем в первой серии при одинаковых значениях силы тока. Это связано с увеличением межэлектродного расстояния и возможным ростом площади анодного пятна.

При увеличении силы тока от 167 до 200 А расчетная температура анодного пятна возрастает с 2855 до 2898 К, эффективная температура поверхности расплава - с 2798 по 2856 К; соответственно, удельная скорость испарения также увеличивается (рисунок 3).

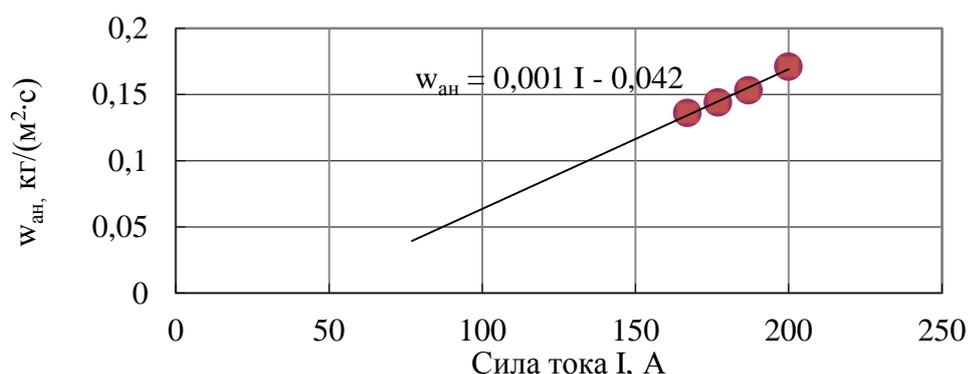


Рисунок 3 – Зависимость удельной скорости испарения в зоне анодного пятна от силы тока

На основе литературных данных о допустимой плотности тока для промышленных дуговых печей получена зависимость  $j=A \cdot d^{-0,5}$ , где  $d$  – диаметр электрода и  $A = \text{const}$ . Величина  $A$  зависит от рода тока, качества электродов, в частности, от удельного электрического сопротивления.

Если предположить, что основная масса пыли образуется в зоне активного взаимодействия дуги с металлом под электродом, и площадь анодного пятна

равна площади электрода, то её количество для печей разной вместимости можно определить из соотношения

$$\Delta m = k \cdot w_{\text{экс}} \cdot S_{\text{ан}} \cdot t, \text{ кг}, \quad (4)$$

где,  $k$  - безразмерный коэффициент, зависящий от диаметра электрода и плотности тока. Для дуговых печей постоянного тока  $k = (d_{\text{экс}}/d)^{-0,5} \cdot j/j_{\text{экс}} = 0,58$ ;  
 $w_{\text{экс}}$  - удельная скорость пылеобразования,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  
 $S_{\text{ан}}$  - площадь активного взаимодействия дуги с расплавом,  $\text{м}^2$ ;  
 $t_{\text{ср}}$  - время воздействия, с.

При воздействии дугового разряда на железо в лабораторных условиях среднее значение удельной скорости испарения составляло  $0,15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Полученный результат использован для оценки количества испарившегося железа в зоне воздействия дуг ДППТ различной вместимости. Например, для ДППТ вместимостью 80 т с диаметром электрода 600 мм ( $S_{\text{ан}} = 28,26 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ ) и при среднем времени работы под током 48 минут количество испарившегося железа в зоне действия дуг по уравнению (4) равно  $\Delta m^{\text{Fe}} = 0,58 \cdot 0,15 \cdot 28,26 \cdot 10^{-2} \cdot 0,8 \cdot 3600 = 71 \text{ кг Fe}$  или 101 кг в виде  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Результаты расчёта удельного образования пыли в результате воздействия дуг на расплав для печей различной вместимости представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Образование пыли в печах постоянного тока различной вместимости

Параметр	Вместимость, т			
	6	12	25	80
Диаметр электрода, мм	250	300	400	600
Площадь анодного пятна, $\text{м}^2$	0,05	0,07	0,13	0,28
Время под током, ч	0,9	0,9	1,0	0,8
Вынос пыли за время плавки по уравнению (3), кг	14	20	39	71
Расчет по литературным данным	4,2-20,4	8,4-40,8	17,5-85	70-340
Удельное образование пыли, $\text{кг}/\text{т}$ стали				
$m_{\text{уд}}^{\text{Fe}} = \Delta m^{\text{Fe}}/m_{\text{ст}}$	2,3	1,7	1,6	0,9
$m_{\text{уд}}^{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \Delta m^{\text{Fe}_2\text{O}_3}/m_{\text{ст}}$	4,2	3,0	2,9	1,6

Как следует из таблицы 3, полученные результаты оценки пылеобразования в зоне воздействия дуг, согласуются с литературными данными для ДППТ различной вместимости. Исследование процесса пылеобразования весьма важно для малых ДСППТ, так как они в основном используются для выплавки высоколегированных марок стали и сплавов особого назначения. При этом потери легирующих могут быть весьма существенными.

В третьей серии экспериментов изучали процесс пылеобразования при дуговом нагреве оцинкованной стали на образцах оцинкованного листа из стали 20 (сила тока от 167 до 200 А). Химический состав стали по ГОСТ 1050-88 представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Химический состав стали 20, %

C	Si	S	P	Cr	Cu
0,06	0,007	0,004	0,0032	0,02	0,01

Толщина стального листа составляла 0,541 мм, поверхностная плотность цинкового покрытия, при условии, что оно состоит из чистого цинка, составляет  $137,5 \text{ г/м}^2$  с каждой стороны. Для плавки использовали 7 пластинок размером  $10 \times 10 \text{ мм}$ , массой  $0,45 \pm 0,05 \text{ г}$  (рисунок 4а). Масса цинкового покрытия на одной пластинке с двух сторон составляет:  $m_{\text{Zn}} = 137,5 \cdot 10^{-4} \cdot 2 = 0,0275 \text{ г}$  или 6,1%. Таким образом, в одном переплавляемом образце содержалось  $0,0275 \cdot 7 = 0,1925 \text{ г}$  цинка.

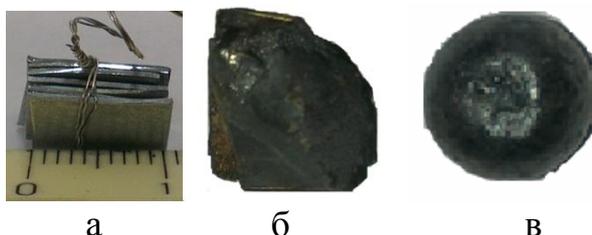


Рисунок 4 - Образцы оцинкованных пластин: а - до эксперимента, б, в - после эксперимента 5 и 60 секунд, соответственно

Зависимость скорости испарения оцинкованной стали от времени плавки приведена на рисунке 5. При плавке чистого железа скорость испарения почти не зависит от времени воздействия дуги и не превышает  $0,005 \text{ г/с}$ . При плавке оцинкованной стали наблюдалось интенсивное испарение в экспериментах длительностью менее 15 с. При увеличении времени воздействия дуги на образцы оцинкованной стали скорость испарения уменьшается и не превышает  $0,01 \text{ г/с}$ . Можно предположить, что при воздействии дуги на оцинкованную сталь в первые 10 с испаряется цинк.

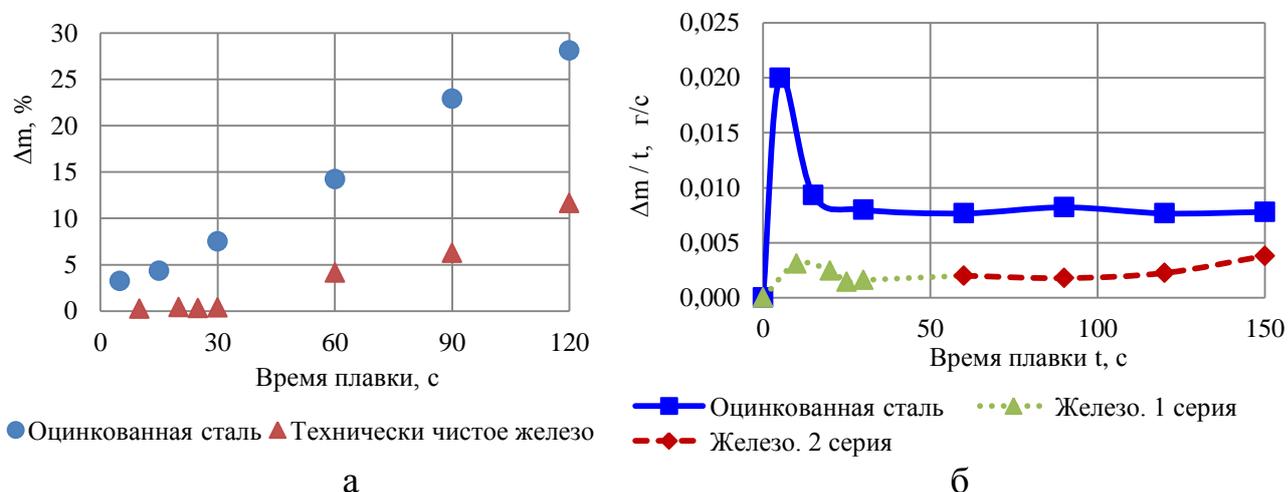
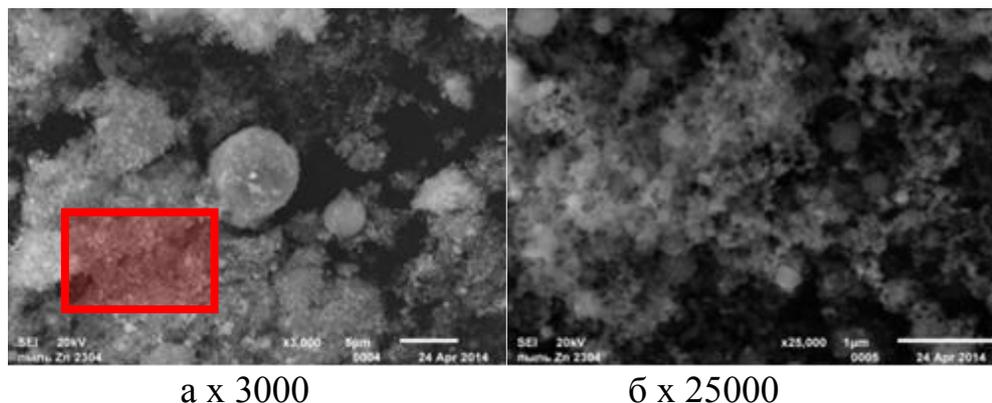


Рисунок 5 – Зависимости потери массы (а) и скорости испарения (б) от продолжительности плавки

Образующиеся в процессе плавки оцинкованной стали пары конденсируются на холодных стенках камеры печи. Собранный после экспериментов конденсат изучали с использованием рентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV.

На рисунке 6 приведены электронные фотографии конденсата, собранного после плавки оцинкованной стали в течение 120 с ( $I = 167 \text{ А}$ ). Анализ показал, что

структура порошка неоднородна. Встречаются сферические частицы (предположительно, оксиды железа), частицы различной формы и размеров, а также губчатые агрегаты размером от 3 до 30 мкм.



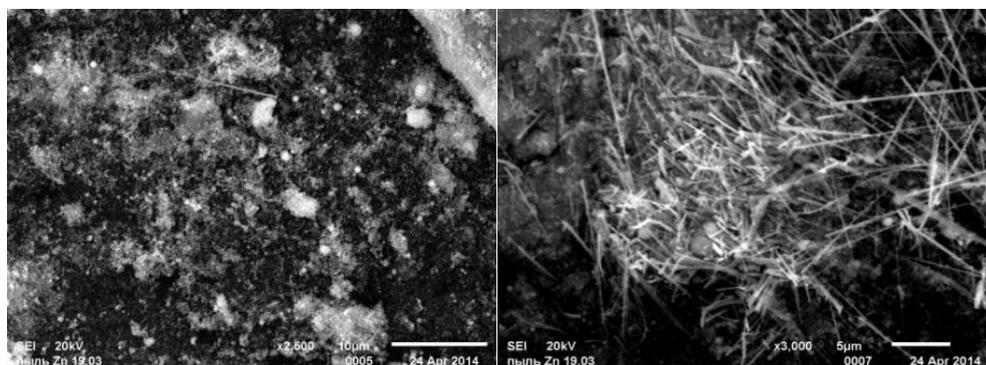
а x 3000

б x 25000

Рисунок 6- Микроструктура пыли после плавки оцинкованной стали ( $I=167$  А)

На фотографии (рисунок 6б) видно, что данные агрегаты состоят из округлых частиц размером от 175 до 500 нм, слипшихся в единую массу. Микрорентгеноспектральный анализ частиц пыли показал наличие в них Fe-39%; O –22%; Zn-21%; C - 10,5%. Оценка вещественного состава по программе «Terra» показала, что они, предположительно, состоят из оксидов железа  $Fe_3O_4$  (50,6 %), цинка ZnO (31,9 %), а также углерода C (15,6 %) и чистого железа Fe (1,9 %).

При силе тока 200 А ( $t = 120$  с) в пыли обнаружены игольчатые образования (рисунок 7б).



а x 2500

б x 3000

Рисунок 7- Микроструктура пыли после плавки оцинкованной стали ( $I=200$  А)

При увеличении в 3000 раз видно, что игольчатые частицы имеют толщину менее 0,5 мкм и длину от 1 до 20 мкм. Локальный рентгеноспектральный анализ показал, что частицы состоят из углерода (53,1 %), цинка (18,9 %) и кислорода (23,2 %). Кроме того, в небольших количествах в них присутствует железо (4,2 %). При пересчете на оксидный состав с помощью программы «Terra» получено, что игольчатые структуры могут иметь в своем составе ZnO (31,1 %), углерод ( $C_{TB}=62,9$  %). Возможно, что при увеличении силы тока более интенсивно испаряется графитовый катод; при конденсации углерод формирует цепочки, похожие на игольчатую структуру; пары Zn, окисляясь, могут осаждаться на частицах углерода.

Можно сделать вывод, что условия плавки существенно влияют на структуру пыли, ее химический и дисперсный составы. Результаты анализа показывают, что пыль обогащена цинком (~20 %), причем при пониженных значениях силы тока он вместе с железом (~40 %) входит, в основном, в состав пористых агрегатов, а при увеличении силы тока - вместе с углеродом (63 %) в состав игольчатых образований. На основе экспериментов установлено, что при дуговом нагреве оцинкованной стали цинк практически полностью испаряется в течение первых 20 с. Из полученных результатов можно сделать вывод, что частицы разного размера и состава образуются с временным разрывом в разных температурных зонах, поэтому их можно улавливать селективно.

Полученные в ходе лабораторных экспериментов образцы пыли являются интересным объектом для дальнейшего исследования и выявления сфер их непосредственного применения.

**Третья глава** посвящена изучению свойств пыли электросталеплавильного производства. Изложены методы определения характеристик пыли, результаты анализа и выводы по каждому анализу. Объектами исследования служила пыль ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» и Филиала АО «ОМК-СТАЛЬ» (таблица 6).

Таблица 6 – Результаты анализа элементного состава пыли металлургических комбинатов, %

Предприятие	ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»					Филиал АО «ОМК-СТАЛЬ»	
	Шахтная ДСП					ДСП	Вакууматор
Агрегат							
№ образца	1	2	3	4	5	6	7
Fe	25,4	24,3	24,9	25,0	28,3	25,8	4,61
Zn	11,0	13,0	12	13,7	14,6	16,3	4,61
Pb	2,2	2	2,1	1,4	1,6	1,3	1,61
Al	0,64	0,05	0,57	0,83	0,54	0,42	0,33
Ca	5,6	3,0	4,3	7,9	6,4	11,6	3,26
Cr	0,22	0,24	0,23	0,16	0,16	0,23	0,034
Cu	0,15	0,15	0,15	0,13	0,19	0,19	0,65
K	1,9	0,23	1,1	1,5	2,0	1,6	0,25
Mg	1,5	-	1,5	1,0	1,0	2	15,2
Mn	2,3	2,2	2,3	1,4	1,5	1,7	34,4
Na	1,1	-	1,1	1,1	1,6	1,4	0,27
Ni	0,02	0,05	0,035	0,02	0,02	0,023	<0,01
P	<0,1	-	0,1	<0,1	<0,1	0,08	-
Ti	0,06	-	0,06	0,10	0,059	0,056	0,005
V	0,016	-	0,016	0,022	0,023	0,01	<0,01
C	7,9	7,9	7,9	2,73	2,96	1,83	-
S	1,6	1,6	1,6	0,8	0,8	0,74	-
SiO <sub>2</sub>	-	9,7	13,5	18,15	19,1	-	-

Анализ элементного состава проводился в лабораториях диагностики материалов (№ 17) ИМЕТ РАН и аналитического и экоаналитического контроля НИТУ МИСиС.

Анализ фазового состава пыли на рентгеновском дифрактометре показал присутствие магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, цинкита ZnO и других оксидов – Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO. Методом мессбауэровской спектроскопии установлено, что на магнетит

приходится около 40 % всех железосодержащих соединений, на составляющую с  $\text{Fe}^{3+}$ -35,69 %, на железистый силикат с  $\text{Fe}^{2+}$ -8,72 %, на гидрогетит-7,86 %. Гравиметрический метод показал, что содержание  $\text{SiO}_2$  достигает 19,1 масс. %. Содержание углерода в образцах колебалось в интервале 1,8-8 масс. %.

Использованные методы не позволяют определять количество кислорода в сталеплавильной пыли, поэтому содержание оксидов оценивали расчетным путем, в первом приближении приняли, что все элементы находятся в виде оксидов. Расчет основан на реакциях окисления компонентов в соответствии со стехиометрическими коэффициентами. Получено, что массовая доля кислорода в исследуемой пыли составляет ~ 25 %.

Наличие сложных соединений в составе электросталеплавильной пыли, в том числе с серой и углеродом, оценивали расчетным путем с использованием программы термодинамических расчетов «Терга», предназначенной для моделирования фазового и химического равновесия многокомпонентных систем.

Получено, что состав конденсированной фазы существенно зависит от температуры. При предположении, что анализируемая пыль формировалась равномерно на протяжении всей плавки, с учетом наличия существенного градиента температуры в пространстве печи можно ожидать, что уловленная пыль содержит частички из разных температурных зон. То есть, наряду с оксидами железа ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), марганца ( $\text{MnO}$ ), цинка ( $\text{ZnO}$ ), образовавшимися в низкотемпературных зонах, в составе пыли возможно присутствие  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}$ ,  $\text{MnS}$  и  $\text{ZnS}$ , которые образуются при более высоких температурах и могут сохраниться без изменений при быстром неравновесном охлаждении. Свинец в изученных условиях может находиться в пыли в виде сульфида  $\text{PbS}$ .

С другой стороны, как показали лабораторные исследования, легколетучие компоненты попадают в газовую фазу и удаляются из печи в процессе расплавления шихты, поэтому  $\text{Zn}$  и  $\text{Pb}$ , вероятнее всего, удаляются в ходе расплавления шихты. Это подтверждается в работе литературными данными.

Проведено исследование дисперсного состава пыли на лазерном дифрактометре. В качестве образцов выбрана пыль, уловленная из разных агрегатов – дуговой шахтной печи (образец 3, таблица 6), дуговой сталеплавильной печи обычного типа (образец 6, таблица 6) и из вакууматора (образец 7, таблица 6). На рисунке 8 представлено распределение частиц пыли по размерам для трёх образцов, отобранных на различных агрегатах.

Во всех исследованных образцах электросталеплавильной пыли, отобранных из дуговых печей, более 50 % частиц имеют размер менее 10 мкм, 15 % частиц – менее 200 нм (рисунок 8). Распределение частиц пыли по размерам является не мономодальным (т.е. имеющим широкий максимум во всём диапазоне размера частиц), как было обнаружено ранее, а имеет полимодальный характер распределения, т.е. имеющие два и более четко выраженных максимума.

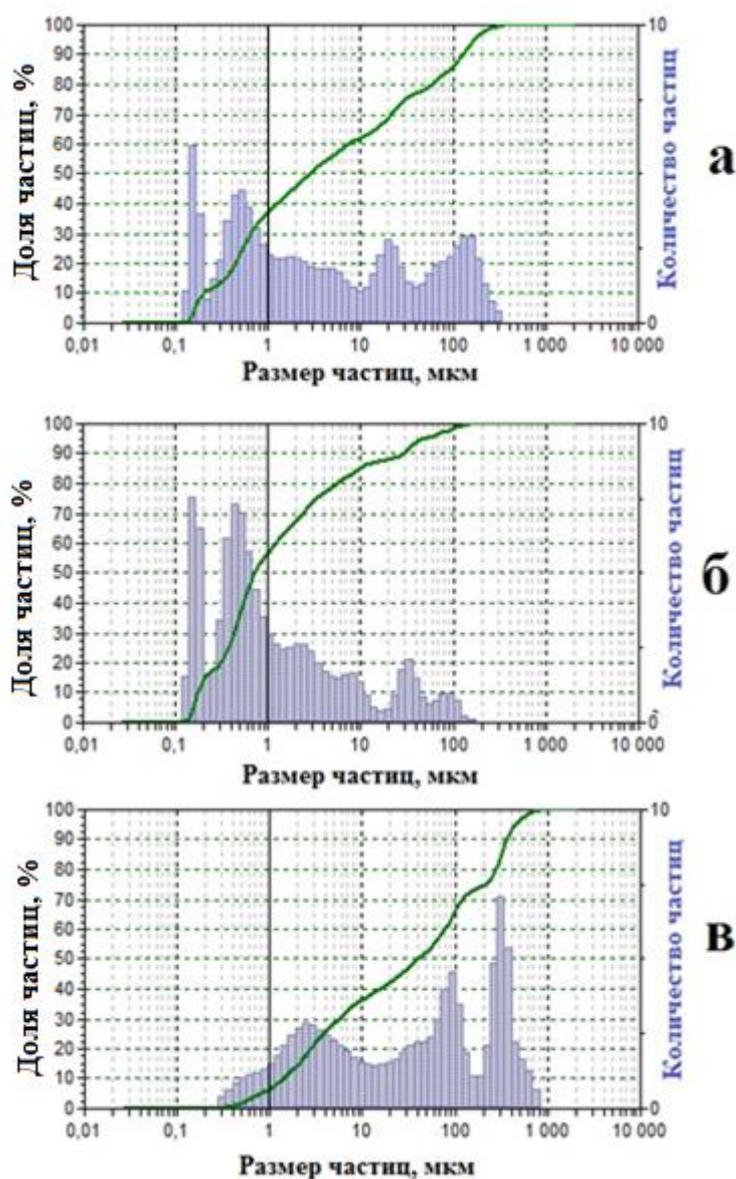


Рисунок 8 – Дисперсный состав пыли образцов: а – пыль дуговой шахтной печи, б – пыль дуговой печи с традиционной загрузкой, в – пыль из вакууматора

В дуговых шахтных печах ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» (рисунок 8а) и вакууматоре в Филиале АО «ОМК-СТАЛЬ» (рисунок 8в) завалка осуществляется жидкими материалами, а в дуговой сталеплавильной печи в Филиале АО «ОМК-СТАЛЬ» (рисунок 8б) - твердыми. Пыль, уловленная из вакууматора, состоит из более крупных частиц примерно от 1 до 900 мкм и имеет 3 максимума (рисунок 8). В ней отсутствуют первые два максимума, характерные для пыли ДСП в области менее 1 мкм и появляется максимум в области 500-1000 мкм.

Первый максимум в дуговых печах объясняется воздействием электрической дуги, причем образование пыли при работе с твердой завалкой выше за счет эрозии шихты. Второй максимум интерпретируется испарением в подфурменной зоне, а высокая доля частиц (70 %) размером 0,2-0,8 мкм в печи, работающей на твердой шихте, объясняется тем, что продувку начинают раньше, чем в печах, работающих на жидкой шихте. Третий максимум одинаковый во всех

исследуемых образцах пыли, доля частиц размером 2-3 мкм составляет 20-30 %. Это значит, что процесс образования пыли не зависит от технологического режима и используемого агрегата. Четвертый и пятый максимумы объясняются образованием пыли при разрыве пленки металлических и шлаковых пузырьков, соответственно. Это объясняется тем, что радиус пузырька шлака больше радиуса пузырька металла, а соотношение между их поверхностными натяжениями имеет обратную зависимость. При использовании в качестве шихты жидких материалов доля частиц крупнее 10 мкм будет выше, чем при работе с твердыми материалами. Таким образом, на основе данных о дисперсном составе пыли можно судить о процессах её образования.

Анализ морфологического состава пыли проводили на сканирующем электронном микроскопе фирмы JEOL. Объектом исследования был образец №3 (табл. 6) пыли дуговой шахтной печи, который предварительно был разделён на три фракции методом вымывания с использованием воды.

На рисунке 9 представлены изображения микроструктуры частиц крупной фракции. При увеличении в 17000 раз (рисунок 9а) видны частицы различных форм и размеров, некоторые составляют сплошную массу. При увеличении в 30000 раз (рисунок 9б) отчетливо видно наличие как сферических частиц диаметром от 80 до 300 нм, так и больших кристаллов прямоугольной формы с размерами до 1 мкм и более.

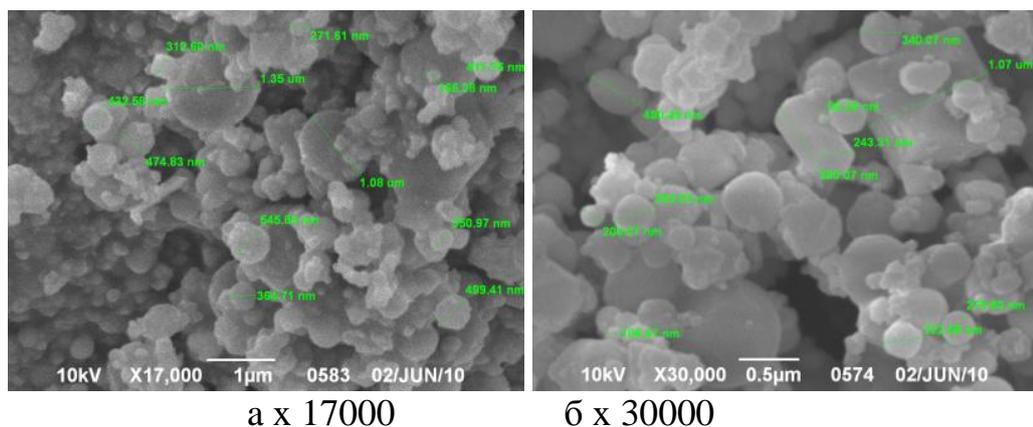


Рисунок 9 – Микроструктура частиц крупной фракции

Изображения отдельной сферической частицы приведены на рисунке 10. При увеличении видно, что она представляет рыхлую массу, образованную отдельными, в основном округлыми, частицами. На поверхности этой сферической частицы при большем увеличении (рисунок 10б) отчетливо видны частицы диаметром менее 1 мкм.

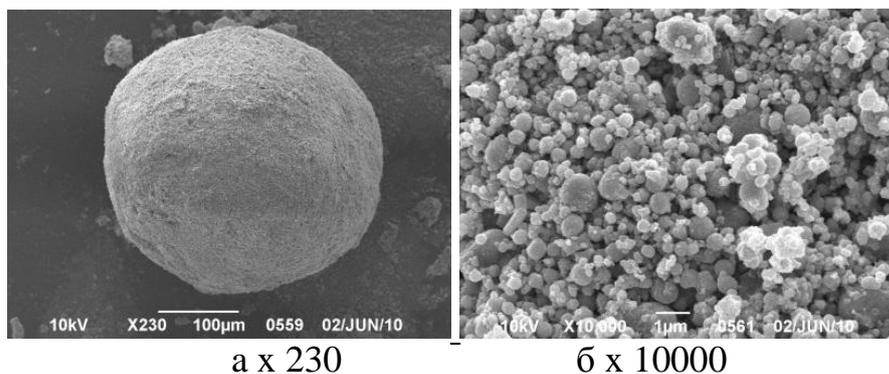


Рисунок 10- Микроструктура сферических частиц

На рисунке 11 приведена микроструктура частиц пыли средней фракции, на которых видны округлые частицы разных размеров: от 175 нм до 2 мкм, слипшиеся в единую массу. В образце средней фракции присутствуют также крупные образования слоистой структуры.

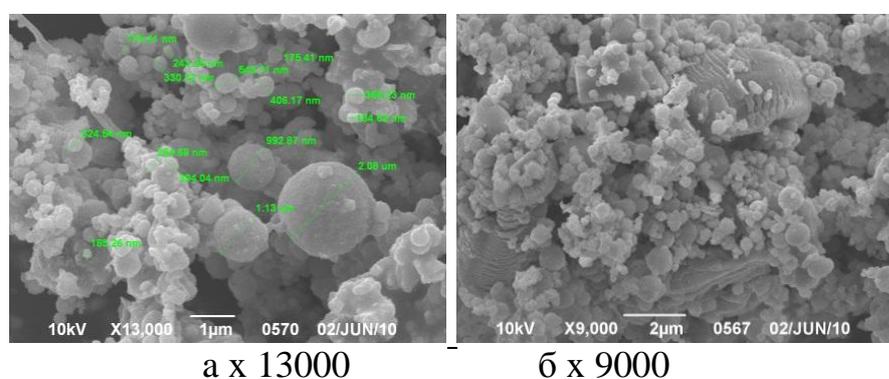


Рисунок 11- Микроструктура частиц средней фракции

На рисунке 12 представлены изображения лёгкой фракции электросталеплавильной пыли, в которой видны сложные пластинчатые образования, а также мелкие частицы неправильной формы.

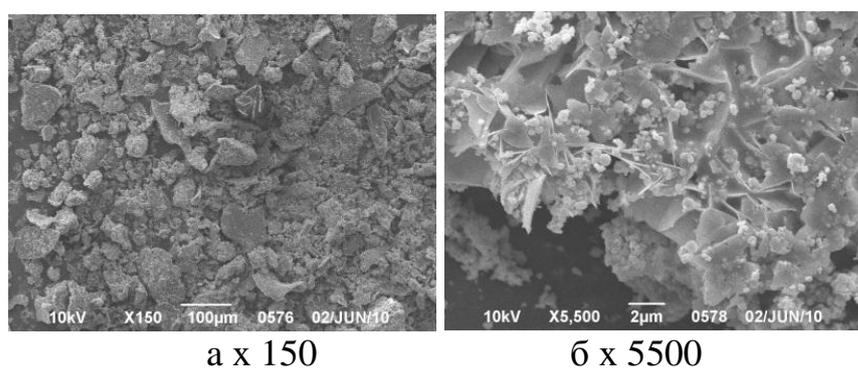


Рисунок 12 – Микроструктура частиц легкой фракции

Таким образом, проведённые исследования морфологии электросталеплавильной пыли позволяют предположить, что пыль формируется при образовании в газовой среде мелких взвешенных частиц. Это происходит, когда мельчайшие капли при коалесценции образуют вновь шарообразную капельку. Однако в пыли наблюдается большое количество частиц неправильной формы, слипшиеся колонии из сферических частиц. Это бывает в том случае,

когда сталкивающиеся капли состоят из очень вязких жидкостей, и процесс слияния в одну шарообразную каплю замедляется, происходит только их слипание.

Крупные агломераты частиц и индивидуальные частицы имеют сферическую форму, что подтверждается большими значениями фактора круга (0,80 – 0,95), близкими к 1. Размеры агломератов частиц в пыли доходят до 100 мкм и более. Однако они легко разбиваются механическим перемешиванием в воде. Это дает перспективную возможность фракционирования порошка с целью выделения ультрадисперсных частиц и отделения крупных частиц, которые выпадают в осадок.

Зная состав и свойства пыли электросталеплавильного производства, можно рассмотреть направления её использования. Наличие большого количества железа (~25 % масс., табл. 6) в электросталеплавильной пыли создаёт предпосылки для её применения в качестве наполнителя для повышения магнитных свойств композитов. Возможно её использование в качестве наполнителей для пленочных и волокнистых композиционных материалов на основе полиакрилонитрила (ПАН). Проведённые испытания термических свойств опытных образцов композиционного материала с использованием пыли (пыли 5% и 10%) показали, что все экзотермические эффекты, связанные с термоокислительной деструкцией смещены в область более высоких температур. Характерные пики экзотермических эффектов для опытных образцов наблюдались в интервалах температур до 310 и до 620 °С, что в среднем на 30-35 °С выше, чем для образца ПАН без добавления пыли. Получен важный практический результат – термостабильность образца ПАН возрастает при добавлении пыли электросталеплавильного производства.

**В четвертой главе** на основе термодинамических расчетов изучена возможность селективного извлечения цинка и свинца в зависимости от температуры и содержания углерода в пыли.

Основные реакции, описывающие поведение цинка и свинца и их оксидов, приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Реакции, описывающие поведение Zn и Pb

№	Реакция	Процесс	Температура начала реакции, К
Свинец и его оксиды			
1	$Pb_{(ТВ)}=Pb_{(ж)}$	плавление	600
2	$Pb_{(ж)}=Pb_{(г)}$	кипение	2018
3	$PbO_{(ТВ)}=PbO_{(ж)}$	плавление	1158
4	$PbO_{(ж)}=Pb_{(ж)}+1/2O_2$	разложение	1808
5	$PbO_{(ж)}=PbO_{(г)}$	кипение	1808
Цинк и его оксиды			
6	$Zn_{(ТВ)}=Zn_{(ж)}$	плавление	693
7	$Zn_{(ж)}=Zn_{(г)}$	кипение	1179
8	$ZnO_{(ТВ)}=Zn_{(г)}+1/2O_2$	разложение	2248
Реакции восстановления			
9	$2PbO_{(ТВ)}+C=2Pb_{(ж)}+CO_2$	восстановление	600
10	$PbO_{(ТВ)}+CO=Pb_{(ж)}+CO_2$	восстановление	300-400
11	$ZnO_{(ж)}+C_{(КОКС)}=Zn_{(г)}+CO$	восстановление	1100-1200

Моделирование процессов восстановления и испарения цинка и свинца из металлургической пыли проводили с помощью программы «Terra». В качестве исходных данных использовали состав пыли шахтной ДСП ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» (образец 3, таблица 6). На рисунке 13 приведен график зависимости температуры начала восстановления, разложения и испарения оксидов цинка и свинца в рассматриваемой пыли в зависимости от содержания углерода.

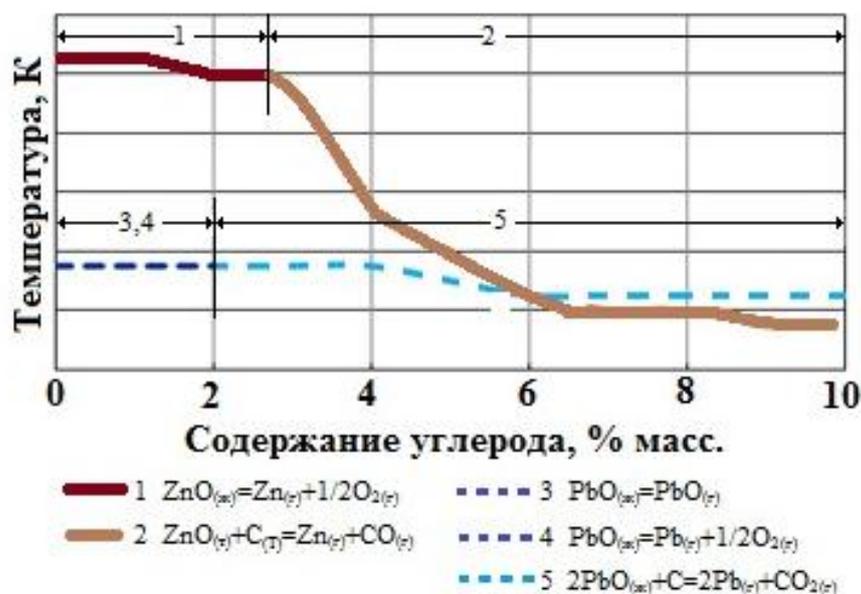


Рисунок 13- Зависимость температуры начала восстановления, разложения и испарения оксидов цинка и свинца от содержания углерода в пыли

Как следует из рисунка 13, температурные зоны перехода цинка и свинца в пар при низких содержаниях углерода существенно различаются. При содержаниях углерода  $<3\%$  первым в пар извлекается оксид свинца, причем при  $C > 2\%$ , происходит восстановление Pb, а оксид цинка при  $C < 3\%$  разлагается при более высоких температурах (рисунок 13).

Таким образом, термодинамический анализ показывает принципиальную возможность селективного извлечения свинца и цинка из пыли сталеплавильного производства и указывает на условия её практической реализации.

**В пятой главе** приведены методика и результаты экспериментального изучения процессов извлечения цинка и свинца из пыли электросталеплавильного производства с использованием плазменного нагрева на лабораторной плазменно-дуговой установке (ЛПДУ).

Пыль (18-25 г) помещали в графитовые тигли высотой 11-21 мм и диаметром 10-19 мм и с помощью медной проволоки обеспечивали контакт с катодом. Сила тока - 190 А, напряжение 27-30 В, расход аргона составляет  $0,18\text{ м}^3/\text{ч}$ , время проведения эксперимента - от 10 до 240 секунд при общем давлении 0,1 МПа.

Эксперименты проводили на образцах электросталеплавильной пыли ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» и Филиала АО «ОМК-СТАЛЬ». На рисунке 14 приведены

результаты экспериментов - изменение скорости испарения компонентов пыли в зависимости от продолжительности воздействия плазменной дуги.

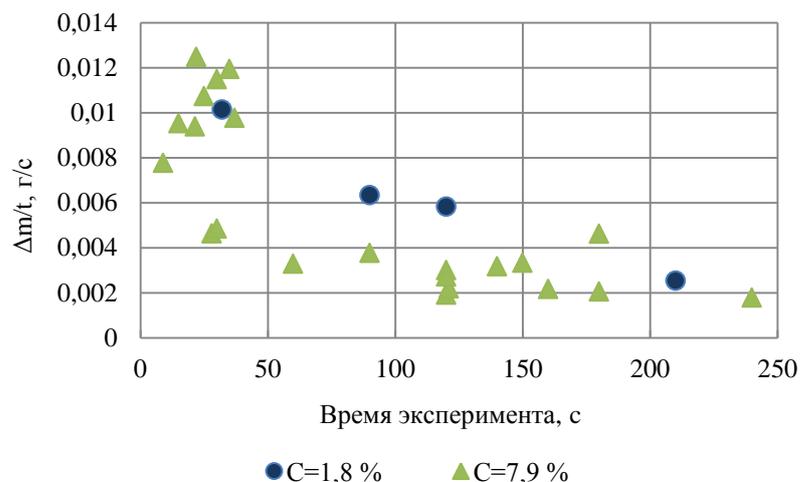


Рисунок 14 - Зависимость скорости испарения компонентов пыли от времени эксперимента

Из рисунка 14 видно, что в начале процесса (~40 секунд) скорость испарения выше, чем в последующем, что может быть объяснено извлечением цинка и свинца из образца пыли.

Материальный баланс процесса выполнен на основе анализа количества образующихся продуктов (конденсата и спёка). Элементный состав полученных образцов приведен в таблице 8.

Таблица 8 - Элементный состав продуктов до и после плазменной обработки, %

Образец	Fe	Zn	Pb	Cu	Mg	Mn	Na	Ti	C*	S*	SiO <sub>2</sub> **
Исходная пыль	24,9	12	2,1	0,15	1,5	2,3	1,1	0,06	7,9	1,6	13,55
Конденсат	7,7	36,4	6,5	1,2	0,42	0,56	1,6	<0,01	-	-	-
Спёк	37,3	0,7	0,14	1,5	3,5	4,3	0,42	0,15	0,36	1,57	-

Анализ состава спёка показал, что в нем остается около 4,5 % углерода и около 98 % серы относительно первоначального содержания элементов в исходном образце. Материальный баланс для образца 2 (таблица 6) приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Материальный баланс обработки сталеплавильной пыли (обр. 1)

До плазменной обработки			После плазменной обработки		
Приход	г	%	Расход	г	%
Исходная пыль	4,23	100,00	Конденсат	1,36	32,41
			Спёк	1,64	39,00
			Брызги	0,03	0,71
			Газы	1,17	27,88
Сумма	4,23	100,00	Сумма	4,21	100,00

Содержание основных компонентов в конденсате и спёке приведено в таблице 10. Степень извлечения цинка и свинца определяли по уравнению:

$$\beta_{\text{Me}} = \frac{m_{\text{Me}}^{\text{исх}} - m_{\text{Me}}^{\text{спек}}}{m_{\text{Me}}^{\text{исх}}} \cdot 100 \% , \quad (5)$$

где  $m_{\text{Me}}^{\text{исх}}$  - содержание цинка в исходной пыли;

$m_{\text{Me}}^{\text{спек}}$  - содержание цинка в спёке.

Результаты расчета степени извлечения цветных компонентов из пыли приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Элементный состав пыли до и после плазменной обработки, масс. %

Образец	Fe		Zn		Pb	
	%	г	%	г	%	г
Исходная пыль	24,9	1,07	12	0,51	2,1	0,09
Конденсат	7,7	0,10	36,4	0,50	6,5	0,09
Спёк	37,3	0,61	0,7	0,01	0,14	0,002
Степень извлечения, %	9,77		97,74		95,20	

Из таблицы следует, что конденсат обогащается цинком и свинцом, а в оставшейся после плазменной термической переработки пыли (спёке) содержание указанных элементов снижается до 0,7 и 0,14 %, соответственно.

Зависимость степени извлечения цинка и свинца от времени воздействия плазменной дуги и от содержания углерода в исходной пыли приведена на рисунке 15.

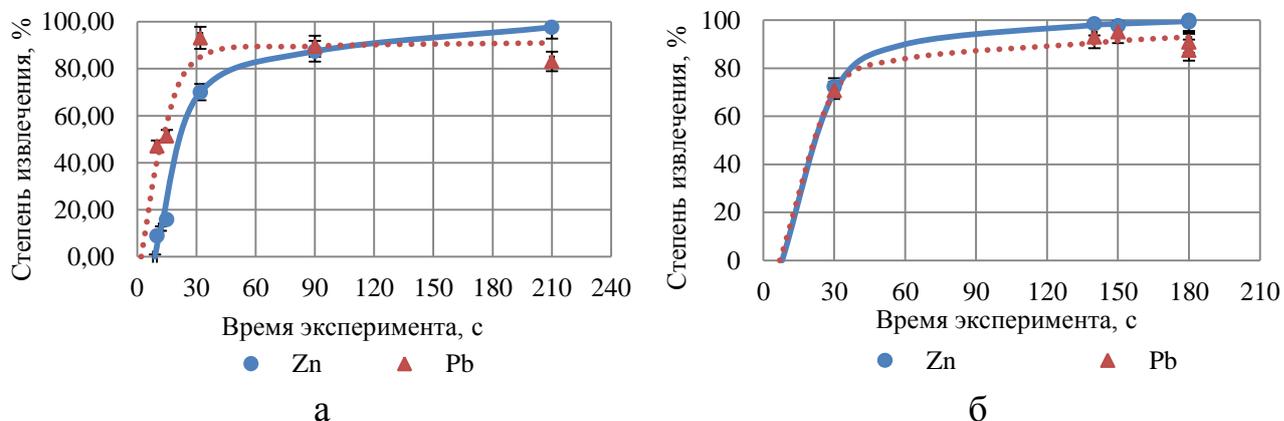


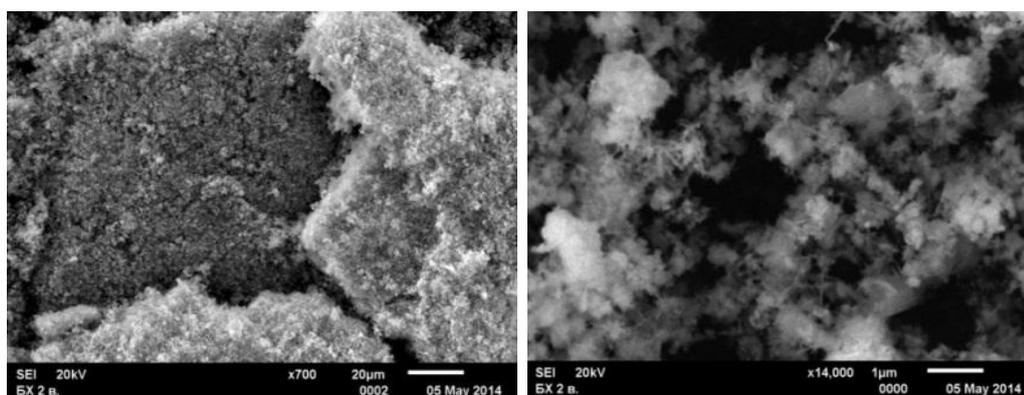
Рисунок 15 – Зависимость степени извлечения цинка и свинца от времени воздействия плазменной дуги: а - менее 3 % С, б - более 3 % С

Из рисунка 15а видно, что пары цинка и свинца при содержании углерода менее 3 % образуются с временным интервалом. Это даёт возможность селективно извлекать свинец и цинк, в зависимости от содержания углерода в пыли. При низком содержании углерода (менее 3 масс. %) первым извлекается свинец, затем цинк. При увеличении времени обработки степень извлечения цинка и свинца из пыли от содержания углерода не зависит.

Обработка сталеплавильной пыли плазменной дугой позволяет получить конденсат в виде свинцового и цинкового порошков или их оксидов для дальнейшего использования.

Структурный анализ образцов конденсата и спёка проводили на приборе ДРОН 3. Во всех образцах конденсата обнаружены  $PbO$ ,  $ZnO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Pb_3O_4$ . Во всех образцах спёка основными компонентами являются  $Fe$  и  $FeO$ , в незначительном количестве присутствуют  $ZnO$ ,  $ZnS$  и  $PbO$ .

Полученные продукты анализировали также на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV. Изображение микроструктуры конденсата приведено на рисунке 16. Установлено наличие слоистой структуры, что свидетельствует о том, что конденсат оседает на стенки ЛПДУ слоями. Конденсат состоит из ультрадисперсных частиц с отсутствием ярко выраженной формы (рисунок 16б) и преимущественно состоит из цинка, свинца и кислорода, в небольших количествах присутствуют железо, углерод и сера.

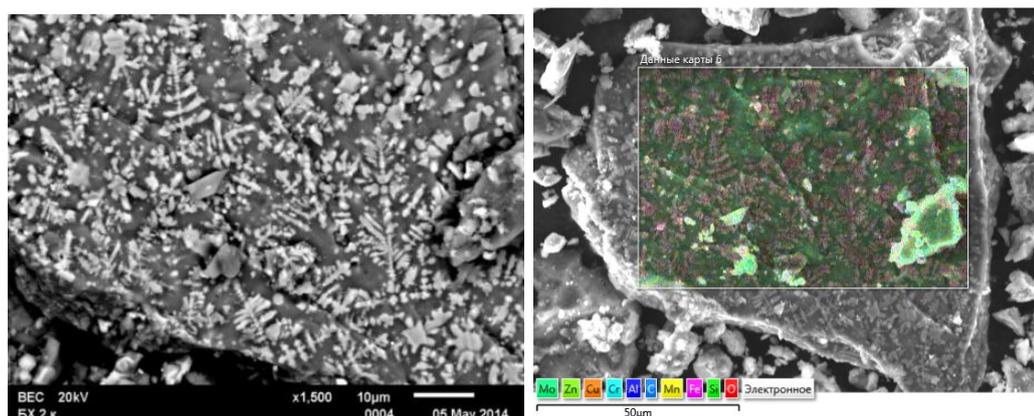


а x 700

б x 14000

Рисунок 16 - Микроструктура конденсата

Изображение микроструктуры спёка приведено на рисунке 17; при увеличении 1500 отчетливо видна дендритная структура. Результаты анализа в виде многослойной карты приведены на рисунке 17б. Видно, что дендритная структура спёка свойственна оксидам железа, также в образце присутствуют кремний, молибден и цинк.



а

б

Рисунок 17 - Микроструктура спёка

Из приведённых данных можно сделать вывод о том, что цинк и свинец практически полностью извлекаются из электросталеплавильной пыли в конденсат. Остаток спёка в тигле состоит в основном из железа и его оксидов.

## Выводы

1. На основе экспериментальных данных по скорости испарения железа в лабораторной плазменно-дуговой печи ( $w_{\text{экс}}=0,15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) получена зависимость  $\Delta m = k \cdot w_{\text{экс}} \cdot S_{\text{ан}} \cdot t$ , кг где,  $k=0,5 \div 1$  - безразмерный коэффициент (фактор подобия), зависящий от диаметра электрода и допустимой плотности тока для ДППТ, которая может быть использована для определения количества образующейся пыли в промышленных печах в зоне воздействия дуг, что было подтверждено литературными данными.

2. Установлено, что при воздействии дуги на оцинкованную сталь в первый момент времени активно испаряется цинк. Получено, что при пониженных значениях силы тока цинк входит в состав ультрадисперсных частиц, основу которых составляет железо, а при увеличении силы тока - в состав игольчатых образований, основу которых составляет углерод.

3. Изучено поведение цинка и свинца при выплавке стали в ДСП на металлическом ломе при их содержании около 0,45 и 0,04 %, соответственно. Показано, что в период выплавки полупродукта удаляется до 99,5 % цинка и 97,5 % свинца.

4. Установлено, что дисперсный состав пыли электросталеплавильного производства описывается кривыми распределения, имеющими четко выраженные максимумы, в том числе два максимума в области менее 1 мкм, которые предположительно образуются в зоне воздействия электрических дуг и подфурменной зоне. Это подтверждается дисперсным анализом конденсата образующегося в вакууматоре, в котором эти максимумы отсутствуют. Анализ максимумов предоставляет дополнительную возможность формирования гипотез о процессах, протекающих в плавильных агрегатах, а также анализа механизмов образования пыли.

5. Проведенный анализ состава пыли ДСП с использованием термодинамических программ позволил разработать рекомендации по изучению состава и свойств металлургической пыли на основе её элементного и дисперсного составов, а также её морфологии. Использование рекомендаций на практике позволяет выявить области применения и возможные пути использования пыли.

6. Проведенные исследования опытных образцов композиционного материала на основе полиакрилонитрила, полученного с добавлением мелкодисперсной фракции пыли ДСП в количестве 5% и 10%, показали увеличение термостабильности по сравнению с исходными образцами (без добавления пыли ДСП) на 30-35 °С.

7. Теоретически обоснованы предельные температуры как совместного, так и селективного извлечения цинка и свинца из пыли электросталеплавильного производства. Экспериментально подтверждена возможность извлечения цветных металлов из пыли ДСП под воздействием плазменной дуги без дополнительного введения восстановителя. При этом степень извлечения цинка достигает 99 %, а свинца 97 %. Показано, что при низком содержании углерода (менее 3 масс. %) первым извлекается свинец, затем цинк, а при увеличении содержания углерода цинк и свинец извлекаются одновременно.

8. Разработаны рекомендации по технической реализации селективного выделения из пыли ДСП железа, цинка и свинца.

Основные результаты работы представлены в публикациях:

Монографии

1. Симонян Л.М., Хилько<sup>1</sup> А.А. Пылеобразование при выплавке стали (электросталеплавильное производство) // Издательство «Lambert Academic Publishing». 2011. С. 99. ISBN 978-3-8465-4256-9.

2. Еремеева Е.А., Хилько А.А., Симонян Л.М. Исследование процесса переработки сталеплавильной пыли // Издательство «Lambert Academic Publishing». 2015. С. 120. ISBN 978-3-659-35387-1.

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Симонян Л.М., Хилько А.А., Лысенко А.А., Михалчан А.А., Сельникова П.Ю. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система // Известия вузов. Чёрная металлургия. 2010. № 11. С. 68-75.

2. Симонян Л.М., Хилько А.А., Зубкова С.В. Свойства электросталеплавильной пыли и анализ возможных направлений ее использования // Электрометаллургия. 2010. № 8. С. 24-28.

3. Симонян Л.М., Хилько А.А., Михалчан А.А., Асташкина О.В., Басок М.О. Структура и свойства металл-оксидных порошков электросталеплавильной пыли и полимерных композитов с их использованием // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. 2011. № 2. С. 70-76.

4. Симонян Л.М., Хилько А.А. К вопросу о пылеобразовании при продувке ванны кислородом: образование и разрыв пузырей CO // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. 2011. № 5. С. 54-57.

5. Simonyan L.M., Govorova N.M., Khil'ko A.A. Dust formation by secondary dispersion on oxygen injection into the smelting bath // Steel in Translation. November 2011. Vol. 41. Iss. 11. pp. 911-917.

6. Симонян Л.М., Говорова Н.М., Хилько А.А. К вопросу о пылеобразовании при продувке ванны кислородом: вторичное диспергирование расплава // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. 2011. № 11. С. 57-63.

7. Хилько А.А., Симонян Л.М., Лысенко А.А. и др. Морфологические особенности электросталеплавильной пыли // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 5. С. 3-6.

8. Хилько А.А., Симонян Л.М., Глинская И.В., Тесёлкина А.Э. Особенности изучения состава электросталеплавильной пыли // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. № 1. С. 9-13.

9. Исакова Н.Ш., Симонян Л.М., Хилько А.А. Изучение процесса пылеобразования при дуговом нагреве металлов // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. № 3. С. 3-9.

---

<sup>1</sup> Хилько – девичья фамилия Алпатовой А.А.

10. Алпатова А.А., Симонян Л.М., Исакова Н.Ш. Изучение процесса пылеобразования при дуговом нагреве оцинкованной стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 5. С. 293-299.

11. Симонян Л.М., Алпатова А.А. Прогнозирование поведения цинка и свинца при выплавке электростали // Металлург. 2016. № 7. С. 36-37.

#### Другие публикации

1. Симонян Л.М., Хилько А.А. Характеристика электросталеплавильной пыли // Атмосфера. Охрана атмосферного воздуха. 2011. № 4. С. 125-130

2. Simonyan L.M., Zhuravleva O.E., Khil'ko A.A. The Use of Plasma-arc for Extraction of Zinc and Lead from the Steelmaking Dust // Journal of Chemical Science and Technology (JCST). 2015. Vol. 4. Iss. I. pp. 1-7.