

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СЕЛЕКТИВНОГО УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ**

**С. В. КОРНЕЕВ**, канд. техн. наук  
Белорусский национальный технический университет

*Получена зависимость времени испарения цинкового покрытия различных классов со стального лома при переплаве металлошихты в электродуговых печах. Для определения времени испарения цинка при использовании пакетов проведено моделирование их нагрева. Полученные результаты позволили определить оптимальный режим работы системы пылегазоочистки с раздельным улавливанием пыли, обогащенной соединениями цинка.*

**Ключевые слова:** соединения цинка, пылевидные отходы, электродуговая печь, селективное улавливание, газоочистка

## **ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF SELECTIVE DUST CAPTURE DURING OPERATION OF GAS CLEANING SYSTEMS OF ELECTRIC ARC FURNACES**

**S. V. KORNEEV**, Ph. D. in Technical Sciences  
Belarusian National Technical University

*The dependence of the evaporation time of zinc coating of different classes from steel scrap during remelting of metal charge in electric arc furnaces was obtained. To determine the evaporation time of zinc when using packages, their heating was simulated. The obtained results made it possible to determine the optimal operating mode of the dust and gas cleaning system with separate collection of dust enriched with zinc compounds.*

**Keywords:** zinc compounds, dust waste, electric arc furnace, selective collection, gas cleaning

**Введение.** При существующей конструкции систем пылегазоочистки электродуговых печей имеется значительная проблема нестабильного состава улавливаемой пыли. Недостаточно высокая

концентрация соединений цинка не позволяет транспортировать такую пыль непосредственно на цинковые заводы, а, следовательно, требуется промежуточная переработка, заключающаяся либо в обогащении пыли инъекцией в электродуговые печи, либо в переработке пыли на специализированных предприятиях с получением оксида цинка с той или иной степенью чистоты. Одним из альтернативных вариантов является снижение генерации пыли (печи с интегрированным подогревом металлошихты и электродуговые печи постоянного тока взамен печей переменного тока), что требует изменения технологической схемы производства и значительных капитальных затрат. Другим вариантом является раздельное улавливание компонентов пыли, зависящих от температурно-временного режима плавки.

В диссертации [1] была предложена система (рисунок 1) удаления пылегазовых выбросов с раздельным улавливанием железа и летучих металлов (цинка и свинца). Идея заключается в раздельном улавливании железа от цинка и свинца по периодам плавки. Было предположено, что легколетучие компоненты (цинк и свинец) будут переходить в пыль в начальный период плавки в процессе нагрева и расплавления шихты, а уже затем железо. Это может позволить получать пыль, обогащенную оксидом цинка для использования в сферах, не требующих дальнейшего разделения от железа или перерабатывать в цинк на цинковых заводах.

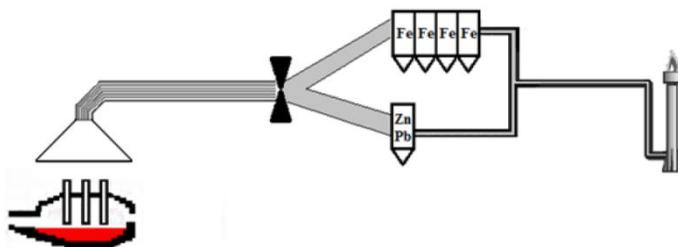


Рисунок 1 – Система раздельного улавливания железа от цинка и свинца [1]

С учетом количества пылегазовых выбросов по периодам плавки реализация такой системы возможна добавлением байпасной ветви с меньшим количеством фильтроэлементов к действующим систе-

мам с их переключением в необходимые интервалы времени работы печи. Однако момент данного переключения не является очевидным, что требует дополнительных оценок.

В работе [2] приведены данные о поведении цинка в кислородном конвертере на протяжении времени продувки, где видно, что содержание цинка в конвертерной пыли меняется в течение периода продувки ванны кислородом и имеет ярко выраженный пик (рисунок 2).

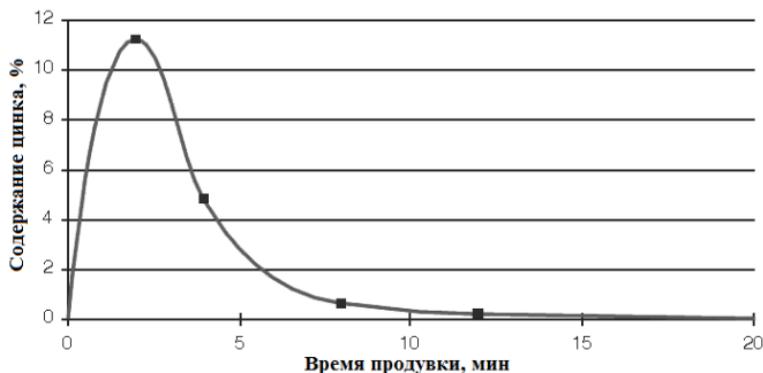


Рисунок 2 – Содержание цинка в пыли при продувке ванны кислородного конвертера

В этой связи для конвертерного производства, в котором используется переплав оцинкованной стали, теоретически представляется возможным реализовать раздельное улавливание пыли, обогащенной цинком. Например, для рисунка 2 критерием времени переключения могло бы быть время, равное половине времени продувки (максимум выделения цинка при этом приходится на первые 2–3 мин продувки, а после 12 мин выделение цинка можно принять близким к нулю).

Процесс испарения цинка при плавке металлошихты в электродуговых печах отличается от плавки металлошихты в конвертерном производстве. Во-первых, в конвертерном производстве доля металлошихты составляет не более 30 %, остальное – жидкий чугу́н, во-вторых, металлолом загружается в конвертер только в самом начале процесса и в-третьих, в связи с особенностями

загрузки через горловину конвертера лом, имеет определенные геометрические характеристики.

Особенностью производства стали в электродуговых печах является большее разнообразие металлошихты и широкое использование пакетов из лома стали. В пакетах 11А/АП-1, 11А/ХКЛ-2, 8А/АП-1, 8А/АП-2, 9А/АП-1, 9А/АП-2, 8А/ХКЛ-1, 8А/ХКЛ-2, 9А/ХКЛ-2 допускается наличие оцинкованного металла.

Размеры пакетов из лома стали 8А/АП-1, 8А/АП-2 составляют не более 500×500×600 мм и представляют собой отходы автолиста прессового производства автомобильных заводов по ТУ ВУ 400074854.038. Размеры пакетов из лома стали 9А/АП-1, 9А/АП-2 составляют не более 2000×1050×750 мм и представляют собой кузовные детали автомобилей и автолиста прессового производства автомобильных заводов по ТУ ВУ 400074854.038.

Фотоизображение стальных пакетов представлено на рисунке 3.

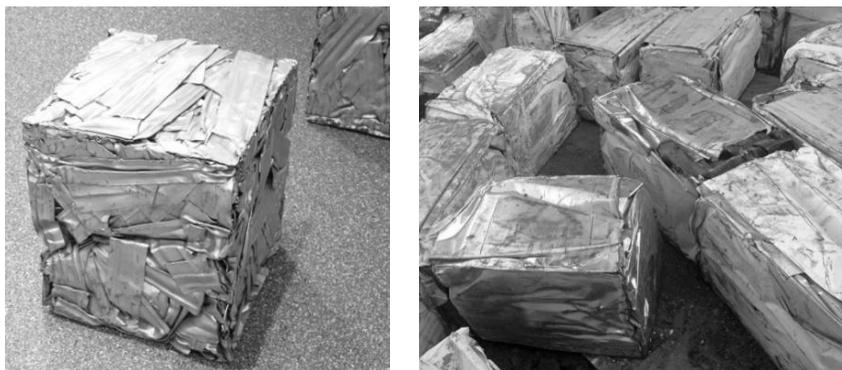


Рисунок 3 – Пакеты стали для вторичной переработки в печах

В зависимости от толщины покрытия оцинкованная сталь делится на 3 класса. Толщина цинкового покрытия в зависимости от класса толщины для стали тонколистовой оцинкованной (ГОСТ 14918-80) представлена в таблице 1.

Оцинкованную сталь изготавливают шириной от 710 до 1800 мм включительно, толщиной от 0,5 до 2,5 мм включительно (0,5 мм, 0,8 мм, 1,2 мм, 2,0 мм, 2,5 мм). Чем меньше толщина листа и больше толщина покрытия, тем больше доля цинка по отношению к ста-

ли и тем больше генерация потока цинка при переплаве металлошихты в сталеплавильном агрегате. Приняв средние значения удельной массы покрытия класса 2 равной  $200 \text{ г/м}^2$ , класса 1 –  $400 \text{ г/м}^2$  и класса П –  $700 \text{ г/м}^2$ , можно определить количество цинка в % к основному металлу для листов различной толщины.

Таблица 1 – Толщина цинкового покрытия в зависимости от класса толщины

| Класс толщины  | Масса $1 \text{ м}^2$ слоя покрытия, нанесенного с двух сторон, г | Толщина покрытия, мкм |
|----------------|---|-----------------------|
| П (повышенный) | 570–855   | 40–60                 |
| 1              | 258–570   | 18–40                 |
| 2              | 142,5–258   | 10–18                 |

Конкретные числовые значения количества цинка по отношению к стали, полученные расчетом, иллюстрирует график на рисунке 4.

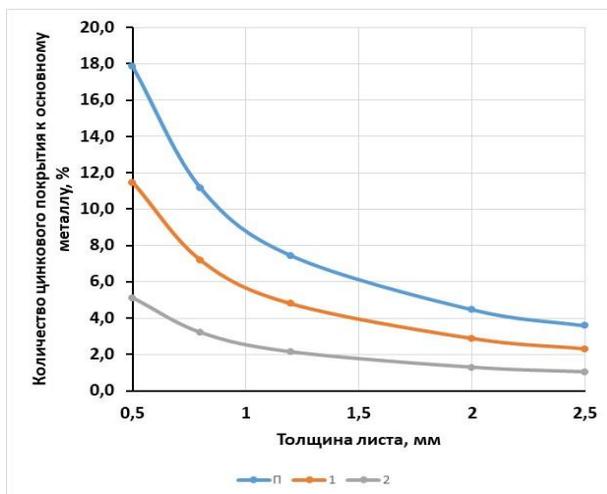


Рисунок 4 – Количество цинка в покрытии в % к основному металлу

Вместе с цинком при переплаве металлошихты в пыль системы газоочистки попадают также кадмий и свинец. Как следует из работы [3], кадмий испаряется первым, а далее – цинк и свинец. Однако

селективное улавливание отдельных металлов практически невозможно в условиях плавки, так как металлошихта крайне неоднородна.

Используя данные из работы [3] по скорости испарения цинка в  $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$  для различных температур в нейтральной атмосфере, определено время испарения цинка с поверхности стали с различным классом толщины цинкового покрытия. На рисунке 5 представлена зависимость времени испарения цинка с поверхности стали от температуры поверхности в нейтральной атмосфере для классов толщины П, 1 и 2.

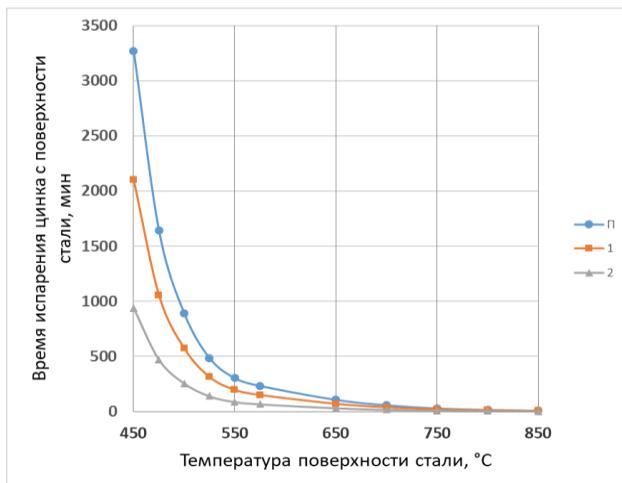


Рисунок 5 – Зависимость времени испарения цинка с поверхности стали от температуры поверхности в нейтральной атмосфере

Как следует из расчетных данных, приведенных на рисунке 5, при температурах выше  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  скорость испарения цинка достаточна для его быстрого испарения с поверхности отдельных кусков металлошихты и, следовательно, возможно его полное удаление за время, не превышающее 10 мин плавки. Однако использование пакетов металлошихты несколько осложняет возможность селективного улавливания пыли, обогащенной цинком, по причине их постепенного прогрева, а, следовательно, замедления процесса испарения цинка из покрытий.

Для оценки температурного перепада при прогреве пакетов стали было проведено физико-математическое моделирование методом конечных элементов. Основой моделирования являлось решение задачи нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 T, \quad (1)$$

где  $a = \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{\rho \cdot c}$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_{\text{эфф}}$  – коэффициент эффективной теплопроводности, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность пакета металлошихты, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг·К).

Коэффициент эффективной теплопроводности определяет скорость распространения теплоты внутри пористого тела, которым является металлошихта, загружаемая в различные металлургические агрегаты, в том числе и пакеты металлошихты. Основными параметрами, влияющими на значения коэффициентов переноса, являются пористость, температура и распределение размеров структурных элементов. Методика расчета коэффициента эффективной теплопроводности представлена в работе [4].

На рисунке 6 представлены результаты расчета нагрева стального пакета с шагом по времени в 200 с.

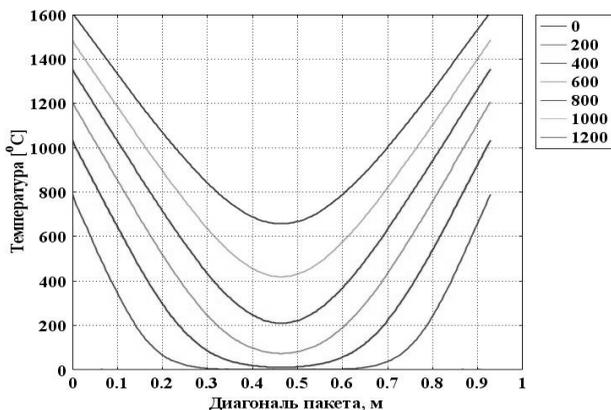


Рисунок 6 – Изменение температурного поля стального пакета с шагом по времени в 200 с при нагреве с мощностью теплового потока, равной 170 кВт/м<sup>2</sup>

Из рисунка 6 следует, что при выбранной мощности теплового потока разность между началом интенсивного испарения цинка с поверхности обрезки листа в пакете и концом составляет более 20 минут.

При более интенсивном тепловом потоке температурный перепад будет увеличиваться, но до того момента, пока геометрические размеры пакета не станут уменьшаться вследствие плавления, т. е. при нахождении пакета в рабочем пространстве электродуговой печи недалеко от дуг, время его плавления, а, следовательно, и время полного испарения цинка будет существенно меньше.

Количественный и качественный состав газов при выплавке сталей представлен в различной литературе. Показано, что в течение периода плавления без продувки кислородом уходящие газы содержат преимущественно нагретый воздух, проникающий в рабочее пространство через различные отверстия, такие как технологическое окно, электродные отверстия и неплотности прилегания свода. Содержание  $\text{CO}_2$  редко превышает 10 %. С продувкой кислородом содержание  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  увеличивается до 60 % и 25 % соответственно. Количество образующегося  $\text{CO}_2$  от дожигания  $\text{CO}$  в рабочем пространстве фактически постоянно и составляет величину около 20 %. Выделяющийся при продувке  $\text{CO}$  ограничивает поступление в рабочее пространство печи через отверстия воздуха. Основная доля указанных газов образуется в зоне горения дуги. Часть газов выделяется из расплава в период кипения и доводки металла.

Если обобщить вышесказанное, то температура газов при плавлении металлошихты (600–1300 °С) меньше чем в период окисления (1200–1700 °С), количество газов в период плавления в 5–10 раз меньше чем в окислительный период, а вынос пыли также в 5–15 раз меньше в период плавления.

В качестве системы очистки в электросталеплавильном цехе, как правило, применяются пылегазоулавливающие установки (ПГУ), которые представляют собой комплекс оборудования для отвода отходящих газов, пыли от ДСП, их охлаждения и фильтрации. Отбор отходящих газов и пыли осуществляется в двух местах:

– из печного пространства через водоохлаждаемый коленообразный патрубков на своде печи (первичное пылеулавливание);

– из верхней части шумодымоизолирующего укрытия печи (вторичное пылеулавливание).

Обеспыливание технологических газов от электросталеплавильных печей чаще всего осуществляется сухим способом в рукавных фильтрах.

В качестве сепаратора пыли применяется рукавной фильтр с автоматической очисткой рукавов с помощью импульсов сжатого воздуха, а транспортировка образующейся пыли из-под холодильника газа и из-под камер фильтров производится скребковыми транспортерами пыли.

Исходя из объема пыли и газов, а также их температуры можно заключить, что мощность фильтрации в период плавления и в окислительный период должны различаться в 2–5 раз. При этом конкретное значение будет зависеть от применяемой металлошихты, технологии плавки и в частности от установленных систем интенсификации плавки в виде газокислородных горелок и инжекторов.

Для дальнейшего анализа возможного режима работы системы газоудаления с разделением пыли представим верхнюю ветвь рисунка 1 условно системой фильтрации «железо», а нижнюю ветвь – системой фильтрации «цинк». Под воздействием дуг образуется 27 % пыли, при продувке ванны кислородом – 60 %, пыли от сыпучих материалов – 13 %. Т. е. приняв, что при продувке ванны кислородом цинк уже полностью удален и поток оксида цинка отсутствует, получаем, что на тонну исходной пыли в систему фильтрации «цинк» попадет около 400 кг, а в систему фильтрации «железо» – около 600 кг пыли. Следовательно, при диапазоне изменения содержания оксида цинка в пыли (например, ОАО БМЗ) на уровне 12,4–43,6 % (или 124–436 кг на тонну пыли) при полном отделении оксида цинка от остальной пыли периода плавки после расплавления металлошихты, получим минимальное содержание оксида цинка на уровне 30 %, а максимальное – более 80 %, т. е. следует ожидать среднее содержание оксида цинка при ее перемешивании на уровне более 55 %.

Как было показано выше, при использовании металлошихты в виде пакетов имеется значительный перепад между температурой поверхности пакета и центром, следовательно, для испарения всего цинка с поверхности металлошихты необходимо довести весь металл пакета до температуры выше 1000 °С. Таким образом, для гра-

фика, представленного на рисунке 7, режим работы системы газоудаления можно представить следующим образом: с 1-й минуты происходит включение системы фильтрации «цинк» еще при завалке металлошихты и далее система работает до 15-й минуты (критерием начала переключения также можно принять выключение газокислородных горелок, так как при этом металлошихта практически расплавляется и далее опытным путем можно подобрать оптимальный момент между 13 и 18 минутами); с 15 минуты по 21 минуту работает система фильтрации «железо». Далее с 21 минуты по 33 минуту – снова система фильтрации «цинк». И наконец, с 33 минуты по 50 минуту работает система фильтрации «железо».

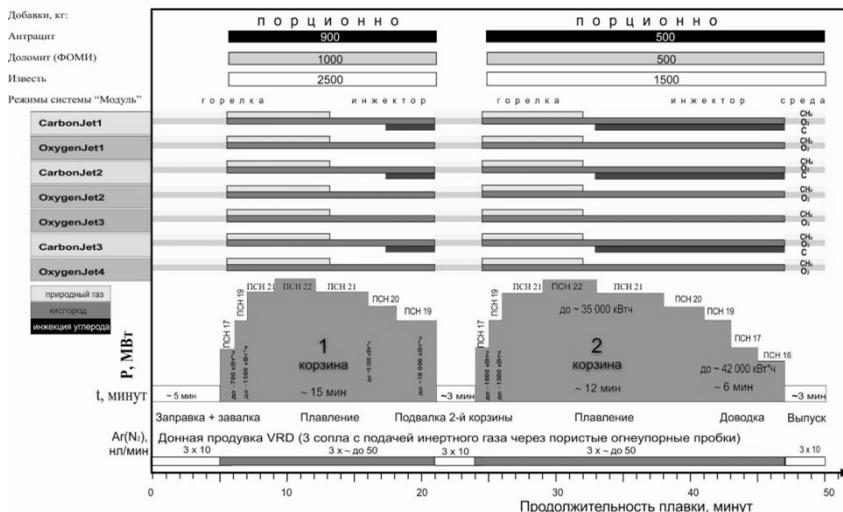


Рисунок 7 – Типовой график режима выплавки стали с использованием металлошихты в виде лома с загрузкой двумя корзинами

Подобный алгоритм возможно использовать и при работе на 100 % металлорома с загрузкой тремя корзинами и особенно при частичном использовании металлургического сырья.

Таким образом, проведенный анализ позволил установить принципиальную возможность использования раздельного улавливания соединений цинка и железа по различным периодам плавки для условий электросталеплавильного производства при некотором изменении конструкции системы газоочистки. Вместе с тем вопрос об

экономической целесообразности обогащения пыли соединениями цинка этим способом с одновременным получением пыли с низкими значениями таких соединений (значительных объемов и без эффективных технологий последующей переработки железосодержащей пыли) остается открытым.

**Заключение.** Проведен анализ литературных данных по работе систем газоочистки электродуговых печей. Получена зависимость времени испарения цинкового покрытия различных классов со стального лома при переплаве металлошихты в электродуговых печах. Для определения времени испарения цинка при использовании пакетов проведено моделирование их нагрева. Полученные результаты позволили определить оптимальный режим работы системы пылегазоочистки с отдельным улавливанием пыли, обогащенной соединениями цинка.

### Список литературы

1. Алпатова, А. А. Исследование процессов пылеобразования при дуговом нагреве металла и свойств пыли с целью ее утилизации: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.07 / А. А. Алпатова; Нац. исслед. техн. ун-т «МИСиС». – Москва, 2016. – 158 с.

2. **Dust arising** during steelmaking processes / Popielska-Ostrowska P. [et al.] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2012. – 55/2. – P. 772–776.

3 **Su, Yu. Ming.** A determination of the rate of evaporation of zinc at atmospheric pressure / Su, Yu. Ming. – Masters Theses. – Missouri. – 1967. – 71 p.

4. **Анализ** теплофизических свойств металлошихты при выплавке в дуговых сталеплавильных печах / И. А. Трусова [и др.] // Литье и металлургия. – 2007. – № 4 (спецвыпуск). – С. 135–139.

### References

1. **Alpatova, A. A.** *Issledovanie processov pyleobrazovaniya pri dugovom nagreve metalla i svoystv pyli s cel'yu eyo utilizacii* [Investigation of dust formation processes during metal arc heating and properties of dust for the purpose of its utilization]: dis. ... kand. techn. nauk:

05.16.07 / A. A. Alpatova; National Research Technological University «MISIS». – Moscow, 2016. – 158 p.

**2. Dust arising** during steelmaking processes / Popielska-Ostrowska P. [et al.] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2012. – 55/2. – P. 772–776.

**3 Su, Yu. Ming.** A determination of the rate of evaporation of zinc at atmospheric pressure / Su, Yu. Ming. – Masters Theses. – Missouri. – 1967. – 71 p.

**4. Analiz** *tepfizicheskikh svojstv metallosihty pri vyplavke v dugovyh staleplavil'nyh pechah* [Analysis of the thermophysical of metal charge during smelting in arc steel-smelting furnaces] I. A. Trusova [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2007. – No. 4 (special issue). – P. 135–139.

*Поступила 12.11.2024*

*Received 12.11.2024*