

ОЦЕНКА ЗАТРАТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЦИНКОМ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЫЛИ ПУТЕМ ИНЖЕКЦИИ В ЭЛЕКТРОДУГОВУЮ ПЕЧЬ

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

В работе проведена оценка средних затрат на обогащение пыли однократной инжекцией пыли в электродуговую печь. Определено увеличение содержания оксида цинка в обогащенной пыли, а также затраты на транспортировку пыли с предварительным обогащением и без обогащения.

***Ключевые слова:** оксиды железа, соединения цинка, пылевидные отходы, восстановление, инжекция, электродуговая печь*

ASSESSMENT OF THE COSTS OF PRELIMINARY ENRICHMENT OF ELECTRIC STEEL MELTING DUST WITH ZINC BY INJECTION INTO AN ELECTRIC ARC FURNACE

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

The work assessed the average cost of dust enrichment by a single injection of dust into an electric arc furnace. An increase in the content of zinc oxide in enriched dust was determined, as well as the costs of transporting dust with and without preliminary enrichment.

***Keywords:** iron oxides, zinc compounds, dust waste, reduction, injection, electric arc furnace*

Введение. При производстве стали в высокомоощных электродуговых печах, особенно переменного тока, неизбежно появление значительного количества пыли, которое уносится в систему пылегазоочистки. В работе [1] обобщены данные по среднему уровню пылеобразования при плавке стали на предприятиях США и Японии, которые показали, что средний уровень пылеобразования

находится в диапазоне от 15 до 17 кг пыли на тонну стали. Так как пыль систем газоочистки является мелкодисперсной и содержит в своем составе такие элементы как свинец, кадмий, хром, хлор и другие, то во всех странах пыль электродуговых печей классифицируют как опасные отходы. Это требует специального обращения с такими отходами, а, следовательно, и оплаты экологических платежей за хранение и захоронение отходов.

С другой стороны, пыль в больших количествах содержит железо, а также может являться источником цинка для цинковой промышленности, так как его содержание в пыли значительно. В подавляющем большинстве случаев производители электростали вынуждены передавать отходы пыли сторонним переработчикам, так как полный цикл переработки пыли с получением очищенного оксида цинка или металлического цинка требует оборудования на большие объемы переработки и соответственно больших финансовых инвестиций. Технологий переработки пыли, эффективно работающих в промышленных масштабах, крайне мало и в настоящее время для переработки пыли преимущественно используется процесс вельцевания. Существуют некоторые альтернативные способы использования электросталеплавильной пыли в различных отраслях, однако они не позволяют обеспечить потребности металлургических предприятий в переработке всех объемов пыли. Некоторое снижение количества пыли наблюдается для процессов с интегрированным шахтным и конвейерным подогревом металлошихты, однако подавляющее большинство технологических процессов выплавки стали имеет в своем составе высокоомощные электродуговые печи без предварительного подогрева шихты.

Таким образом, при необходимости транспортировки пыли сторонним переработчикам актуальной является оценка предварительного обогащения пыли цинком путем известной технологии инъекции пыли непосредственно в электродуговые печи с получением вторичной пыли с более высокой концентрацией цинка (соединений цинка). Следует отметить, что помимо увеличения концентрации цинка также увеличиваются концентрации галогенов и летучих металлов, что несколько затрудняет последующую очистку от них черногого оксида цинка.

Определение баланса материалов с учетом пылеинъекции. Концентрации Fe, Cl и Pb пропорциональны концентрациям Zn в

пыли, и считается, что почти все они переходят из металлошихты в пыль во время плавки из-за улечувивания. Те же процессы происходят при образовании вторичной пыли из первичной. Более сложным является вопрос о восстановлении железа при вдувании пыли в электродуговую печь. В работе Цубоне и соавторов [1] приведены результаты исследований по изменению количества и состава пыли, образующейся при использовании технологии инъекции пыли. Результаты анализа баланса массы до и после инъекции пыли для 5,5 кг/т стали показали, что 31,2 % инжесктурируемой пыли перешло во вторичную пыль, а 64,2 % перешло в шлак. Таким образом, в металл переходит только $100 - 95,4 = 4,6$ % пыли, т. е. восстановление железа и других элементов с переходом в металл крайне незначительно. При увеличении количества вдуваемой пыли следует ожидать, что данное соотношение существенно не изменится. В работе [1] это соотношение принимается для количества инжесктурируемой пыли равного 16,3 кг/т.

Масса пыли, которая образуется на ОАО «Белорусский металлургический завод» (ОАО БМЗ) составляет около 35 000 т в год или около 12 кг/т жидкой стали (при этом объем имеющейся на хранении пыли составляет 158 000 т).

Таким образом, для одного цикла обогащения всей вновь образующейся пыли необходимо подавать в печь на каждую плавку не менее 1200 кг пыли.

Количество вторичной пыли в кг/т включает первичную пыль и дополнительную пыль, получаемую в результате инъекции первичной

$$П_2 = П_1 + k_d П_{инж}, \quad (1)$$

где $П_1$ – количество первичной пыли, кг/т; k_d – коэффициент, учитывающий переход первичной пыли во вторичную пыль; $П_{инж}$ – количество инжесктурируемой в печь пыли, кг/т.

Если количество инжесктурируемой пыли равно первичной, то выражение (1) можно записать в виде

$$П_2 = П_1 + k_d П_1. \quad (2)$$

Количество пыли в результате такой переработки уменьшается и остаточное количество пыли после одного цикла инъекции всей первичной пыли определяется выражением

$$\Pi_{\text{ост}} = \Pi_1 + k_d \Pi_1 - \Pi_1 = k_d \Pi_1. \quad (3)$$

Как показано выше, для оценки коэффициент k_d можно принять по результатам работы [1] в среднем равным 0,312, однако в действительности на отдельных плавках он будет различным, так как различается как химический состав пыли, так и состав металлошихты, генерирующий поток первичной пыли.

Количество вторичной пыли составит:

$$\Pi_2 = 12 + 0,31 \cdot 12 = 15,72 \text{ кг/т.}$$

Количество шлака в результате переработки несколько увеличивается и определяется по выражению

$$\Pi_3 = \Pi_1 + k_s \Pi_1, \quad (4)$$

где k_s – коэффициент, учитывающий переход первичной пыли в шлак.

Диапазон изменения содержания цинка в пыли ОАО БМЗ составляет от 10 до 35 %, а оксида цинка соответственно – 12,4–43,6 %.

Концентрацию оксида цинка в пыли C_1 для дальнейших расчетов принимаем в среднем равной 28 %.

Количество цинка в первичной пыли $KЦ_1 = 0,28 \cdot 12 = 3,36 \text{ кг/т.}$

Количество цинка во вторичной пыли $KЦ_2 = 0,28 \cdot 12 + 0,28 \cdot 12 = 6,72 \text{ кг/т.}$

Концентрация оксида цинка во вторичной пыли $C_1 = KЦ_2 / \Pi_2 = 6,72 / 15,72 = 0,427$ или 42,7 %.

Таким образом, в среднем при однократном цикле инъекции концентрация оксида цинка в пыли увеличивается на 14,7 %.

Количество шлака при этом составит $\Pi_3 = 120 + 0,64 \cdot 12 = 127,7 \text{ кг/т}$ стали (где 120 кг/т принятое количество первичного шлака без пылеинъекции).

Оценка затрат предварительного обогащения цинком электросталеплавильной пыли путем инъекции в электродуговую

печь и без обогащения. К основным затратам при отсутствии переработки пыли и ее захоронении на полигонах относятся затраты на экологические платежи (налог) и транспортные расходы. Эти затраты с учетом уже хранящейся пыли для ОАО БМЗ в настоящее время превышают 100 руб./т пыли.

Рассмотрим затраты по вариантам без использования дополнительной переработки (обогащения) инжекцией и с использованием однократной инжекции пыли в электродуговую печь для ее предварительного обогащения.

В таблице 1 представлены принятые в дальнейших расчетах стоимостные характеристики материалов и энергии.

Таблица 1 – Стоимость материалов и энергии принятых при оценке затрат

Материалы и энергия	Ед. изм.	Стоимость, бел. руб.
Дизельное топливо	л	2,36
Уголь, подготовленный для инжекции	т	450
Электрическая энергия	кВт·ч	0,25439

В качестве варианта 1 принимаем транспортировку пыли на расстояние 600 км автомобильным транспортом в биг-бэгах массой 1 т. Суммарные затраты определяются только затратами на транспортировку пыли до переработчика

$$Z_{\text{сум1}} = Z_{\text{тр1}}, \quad (5)$$

где $Z_{\text{тр1}}$ – транспортные затраты.

В качестве варианта 2 принимаем те же условия транспортировки, но для пыли, прошедшей 1 цикл обогащения цинком инжекцией в электродуговую печь. Суммарные затраты определяются

$$Z_{\text{сум2}} = Z_{\text{а}} + Z_{\text{з}} + Z_{\text{м}} + Z_{\text{тр2}}, \quad (6)$$

где Z_a – затраты на амортизацию оборудования; Z_3 – затраты на дополнительную энергию при переработке; Z_m – затраты на дополнительные материалы при переработке; $Z_{тp2}$ – транспортные затраты.

Отличия в вариантах заключаются в уменьшении объема пыли, а, следовательно, транспортных расходов с одновременным увеличением затрат на обогащение пыли.

Транспортные затраты определим по выражению

$$Z_{тp} = k_1 \frac{Z_t}{D_t}, \quad (7)$$

где Z_t – затраты на топливо; D_t – доля затрат на топливо в транспортных расходах на перевозку грузов; k_1 – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на погрузку, разгрузку и другие работы.

Приведем все затраты к тонне исходной непереработанной пыли. Тогда затраты на топливо при расстоянии 600 км и среднем расходе топлива 35 л на 100 км составят $600 \cdot 35 / 100 = 210$ л дизельного топлива или в денежном выражении $210 \cdot 2,36 / 20 = 24,78$ руб./т (где 2,36 – стоимость литра дизельного топлива, 20 – грузоподъемность в т). Затраты на транспортирование пыли составят:

$$Z_{тp1} = 1,2 \frac{24,8}{0,3} = 99,2 \text{ руб./т.}$$

Как показано выше, количество вторичной пыли при однократном вдувании в печь составит около $1/3$ количества исходной пыли, тогда затраты по варианту 2 составят $99,2 / 3 = 33,1$ руб./т.

При транспортировке пыли железнодорожным транспортом затраты будут несколько ниже чем автомобильным.

Определим стоимость дополнительной переработки инъекцией пыли в электродуговую печь. На восстановление цинка вводится дополнительный углерод (восстановитель) в виде подготовленного мелкодисперсного каменного угля с содержанием углерода 75–92 % (для расчета выберем содержание C = 80 %).

Количество углерода на восстановление цинка из оксида составит $280 \cdot 12 / 81,38 = 41$ кг (где 280 – количество оксида цинка в кг на тонну пыли), а угля $41 / 0,8 = 51$ кг. Таким образом, требуемое

количество дополнительного угля на тонну перерабатываемой пыли при принятой концентрации оксида цинка в первичной пыли равной 28 % составит 51 кг/т.

Затраты на материалы составят: $Z_m = 0,45 \cdot 51 = 23$ руб./т (где 0,45 руб./кг цена 1 кг угля).

Масса восстановленного цинка: $m_{Zn} = m_{ZnO} M_{Zn} / M_{ZnO} = 280 \cdot 65,38 / 81,38 = 225$ кг.

Энергия, требуемая на восстановление, испарение и перегрев цинка из инжестируемой пыли

$$\mathcal{E}_{Zn} = m_{Zn} \Delta H_{Zn} = m_{Zn} (\Delta H_{Zn1} + \Delta H_{Zn2} + \Delta H_{Zn3}),$$

где ΔH_{Zn} – удельная энергия восстановленного и испаренного цинка, кВт·ч/кг; ΔH_{Zn1} – тепловой эффект реакции восстановления цинка, кВт·ч/кг; ΔH_{Zn2} – тепловой эффект испарения цинка, кВт·ч/кг; ΔH_{Zn3} – теплосодержание цинка, перегретого до 1500 °С, кВт·ч/кг.

Определение слагаемых ΔH_{Zn} приводится в работе [2]

$$\mathcal{E}_{Zn} = m_{Zn} \Delta H_{Zn} = 225(0,8192 + 0,4876 + 0,27) = 354,78 \text{ кВт·ч/т пыли.}$$

Теоретическая потребность в энергии на расплавление шлака образовавшегося из инжестируемой пыли определяется выражением

$$\mathcal{E}_{ш} = m_{ш} \Delta H_{ш}, \quad (8)$$

где $\Delta H_{ш}$ – теплосодержание шлака, образованного при плавке пылевидного материала при температуре 1600 °С [2].

Затраты энергии на плавление и перегрев шлака составят:

$$\mathcal{E}_{ш} = 642 \cdot 0,5273 = 338,5 \text{ кВт·ч/т пыли.}$$

Теоретическая энергия, необходимая на восстановление и испарение цинка из пыли и расплавление шлака, полученного из пыли, составит:

$$\mathcal{E}_T = \mathcal{E}_{Zn} + \mathcal{E}_{ш} = 354,78 + 338,5 = 693,28 \text{ кВт·ч/т.}$$

При переработке влажной пыли (после хранения) к полученному значению необходимо прибавлять энергию, требуемую на испарение влаги.

При КПД электродуговой печи на уровне 60 % технологический расход электроэнергии при инъекции пыли составит около $\mathcal{E}_{\text{тех}} = 693,28/0,6 = 1155,5$ кВт·ч/т пыли.

Тариф за потребленную электроэнергию без дифференцирования по времени суток для потребителей с присоединенной мощностью 750 кВА и выше составляет 0,25439 руб./(кВт·ч) (плата за установленную мощность в дополнительном энергопотреблении не учитывается), тогда

$$Z_3 = \mathcal{E}_{\text{тех}} T_3 = 1155,5 \cdot 0,25439 = 293,94 \text{ руб./т.}$$

Оценим капиталовложения в дополнительное оборудование для предварительного обогащения пыли цинком инъекцией пыли в электродуговую печь. Внедрение системы инъекции пыли требует дополнительных затрат для модернизации печей. Стоимость дополнительных элементов системы инъекции для оценок принимаем равной 1000000 долл. США.

Количество пыли, перерабатываемое в одной печи при годовой производительности печи, равной 900000 т в год, составит $900000 / 100 = 9000$ т или $1000000 / 9000 = 111,1$ долл. США/т перерабатываемой пыли.

Приняв срок амортизации оборудования 10 лет, получим амортизационные отчисления:

$$Z_a = 111,1 / 10 = 11,11 \text{ долл. США/т или } 36,6 \text{ руб./т.}$$

Суммарные затраты на транспортирование пыли на переработку с предварительным обогащением инъекцией в электродуговую печь составят:

$$Z_{\text{сум2}} = 36,6 + 293,4 + 23 + 33,1 = 386,1 \text{ руб./т.}$$

Дополнительные затраты на плавку непосредственно в печи составят $1,2 \cdot 353 = 423,6$ руб. (где 1,2 – количество пыли в тоннах на 1 плавку) или на 1 т стали при выпуске 100 т жидкой стали на плавку $423,6 / 100 = 4,24$ бел. руб./т (1,28 долл. США/т). При этом,

как было определено выше, содержание оксида цинка во вторичной пыли увеличится на 14,7 абс. %.

В расчете затрат приведены верхние оценки, в действительности затраты в денежном выражении будут несколько ниже с учетом того, что доля самого дорогого источника энергии, а именно электрической энергии в высокомошных электродуговых печах с системами интенсификации плавки составляет менее 70 %, а общий коэффициент полезного действия электродуговой печи может быть выше 60 %, принятых в расчетах. Однако определить точное распределение топливных и электрических источников для данного процесса в среднем затруднительно и требует отдельных уточнений. Также практически невозможно точно установить энергетические затраты, связанные с переработкой пыли на опытных плавках при их небольшом количестве, так как разброс значений в энергопотреблении на отдельных плавках превышает дополнительные затраты энергии при инжекции пыли. Оценить реальные затраты можно, имея значительный массив данных, а это возможно только после внедрения технологии пылеинжекции на действующую печь.

В работе [3] приведена информация о затратах на переработку пыли во время испытаний технологии инжекции пыли на предприятии Uddeholm Tooling AB. Затраты составили 0,4 долл. США на тонну стали при инжекции пыли в количестве 925 кг/плавку. Испытания включали 100 плавков с переработкой пыли. Среднее содержание цинка в первичной пыли составляло около 21 %, а увеличенное содержание цинка в полученной пыли составило 11 % [3].

Выводы. В результате выполненных расчетов получена оценка средних затрат на обогащение пыли однократной инжекцией пыли в электродуговую печь. Определено увеличение содержания оксида цинка в обогащенной пыли, а также затраты на транспортировку пыли с предварительным обогащением и без него. К преимуществам обогащения можно отнести повышение ценности пыли как вторичного ресурса и снижение затрат в месте окончательной переработки. К преимуществам также относится уменьшение затрат на транспортировку пыли для окончательной переработки, однако это актуально для транспортировки пыли на цинковые заводы, которые находятся на значительном расстоянии. В этом случае требуется не менее 3 циклов инжекции, что уже может оказывать некоторое незначительное негативное влияние на показатели выплавки стали,

например, снижение производительности печей. К недостаткам предварительного обогащения пыли инжекцией можно отнести потери практически всего железа как потенциального ресурса в шлак и невозможность его восстановления в условиях обычного технологического процесса выплавки стали. Также недостатком являются значительные затраты электрической энергии, которая является наиболее дорогим энергетическим ресурсом. В этой связи при переработке пыли вельцеванием на предприятии, находящимся на расстоянии не более 1000 км, экономически обоснована транспортировка пыли без ее предварительного обогащения в электродуговых печах.

Список литературы

1. Material Cost and Benefit Analysis for Dust Injection Technology in EAF Steelmaking Process and EAF Dust Treatment with CaO Addition / S. Koide [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2023. – P. 1–12.

2. Корнеев, С. В. Энергетические параметры физико-химических процессов переработки пыли газоочисток сталеплавильных цехов / С. В. Корнеев, И. А. Трусова // *Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. трудов*. – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 7–15.

3. Yang, Q. Studies on dust recycling in the electric arc furnace at Uddeholm Tooling AB / Q. Yang, B. Gustafsson // *Scandinavian Journal of Metallurgy*. – 2003. – Vol. 32. – P. 147–156.

References

1. Material Cost and Benefit Analysis for Dust Injection Technology in EAF Steelmaking Process and EAF Dust Treatment with CaO Addition / S. Koide [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2023. – P. 1–12.

2. Korneev, S. V. Energeticheskie parametry fiziko-himicheskikh processov pererabotki pyli gazoochistok staleplavil'nyh cekhov [Energy parameters of physical and chemical processes for processing dust from gas purification of steelmaking shops] / S. V. Korneev, I. A. Trusova // *Metallurgiya: Respublikanskij mezhhvedomstvennyj sbornik nauchnyh*

trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers. – Minsk: BNTU Publ., 2021. – Vol. 42. – P. 7–15

3. Yang, Q. Studies on dust recycling in the electric arc furnace at Uddeholm Tooling AB / Q. Yang, B. Gustafsson // *Scandinavian Journal of Metallurgy.* – 2003. – Vol. 32. – P. 147–156.

Поступила 16.11.2023

Received 16.11.2023