



УДК 669.531.5

DOI 10.17073/0368-0797-2025-5-543-549



Оригинальная статья

Original article

УДАЛЕНИЕ ХЛОРА ИЗ ПЫЛИ ДУГОВОГО СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ОКИСЛИТЕЛЬНЫМ ОБЖИГОМ

Е. В. Григорьев[✉], Ю. Е. Капелюшин, А. Бильгенов,
Д. В. Степанов, А. А. Халикулов

■ Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

✉ grigorevev@susu.ru

Аннотация. Рост производства и потребления стали приводит к образованию большого количества техногенных отходов. Одним из отходов выступает пыль электродугового сталеплавильного производства. В Российской Федерации ежегодно образуется порядка 0,7 млн т пыли. В работе изучена пыль одного из металлургических предприятий, в которой цинк преимущественно содержится в виде $ZnFe_2O_4$, а также присутствуют вредные соединения хлора и свинца, которые снижают качество вельц-оксида при последующей переработке. Исследуемая пыль подвергалась высокотемпературному окислительному обжигу в муфельной печи. Эксперименты проводились в интервале температур 300 – 1100 °С при времени выдержки 1 ч. В интервале температур 900 – 1100 °С время выдержки варьировалось в пределах 3 – 9 ч. Фазовый состав пыли определяли с помощью рентгенофазового анализа, химический состав – микрорентгеноспектральным методом. Установлено, что при температуре 900 °С и времени выдержки 9 ч степень удаления хлора составляет 78 %. При температуре обжига 1000 °С и времени выдержки 9 ч степень удаления хлора достигает 99,4 % при потерях цинка 19,8 %. При температуре обжига 1100 °С и времени выдержки 3 ч степень удаления хлора составляет 91,2 %, а потери цинка достигают 37,8 %, поэтому проведение окислительного обжига при данной температуре является нецелесообразным. Экспериментальные исследования показали, что из пыли электродуговой печи, в которой цинк преимущественно содержится в виде $ZnFe_2O_4$, возможно реализовать эффективное удаление хлора методом высокотемпературного окислительного обжига с относительно низкими потерями цинка в интервале температур 900 – 1000 °С.

Ключевые слова: пыль ЭДП, электросталеплавильное производство, рециклинг, хлор, цинк, дехлорирование, вельц-оксид, окислительный обжиг

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10120, <https://rscf.ru/project/24-79-10120/>.

Для цитирования: Григорьев Е.В., Капелюшин Ю.Е., Бильгенов А., Степанов Д.В., Халикулов А.А. Удаление хлора из пыли дугового сталеплавильного производства окислительным обжигом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(5):543–549.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-543-549>

REMOVAL OF CHLORINE FROM ELECTRIC ARC FURNACE DUST BY OXIDATIVE ROASTING

E. V. Grigor'ev[✉], Yu. E. Kapelyushin, A. Bil'genov,
D. V. Stepanov, A. A. Khalikulov

■ South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

✉ grigorevev@susu.ru

Abstract. The growth of steel production and consumption leads to the formation of a large amount of technogenic waste. One of the wastes is electric arc furnace (EAF) dust. In the Russian Federation, about 0.7 million tons of dust are annually generated. The paper studies the dust of one of the metallurgical enterprises, in which zinc is mainly contained in the form of $ZnFe_2O_4$, and also contains harmful compounds of Cl and Pb, which reduce the quality of Waelz oxide during subsequent processing. The studied dust was subjected to high-temperature oxidative roasting in a muffle furnace. The experiments were carried out in the temperature range of 300 – 1100 °C with roasting time of 1 h. In the temperature range of 900 – 1100 °C, the roasting time varied within 3 – 9 h. The composition was determined using XRD phase analysis and micro-X-ray spectral method. It was found that at temperature of 900 °C and roasting time of 9 h the degree of Cl removal reaches 78 %. At temperature of 1000 °C and roasting time of 9 h,

the degree of Cl removal reaches 99.4 % with Zn losses of 19.8 %. At temperature of 1100 °C and roasting time of 3 h the degree of Cl removal is 91.2 %, and Zn losses reach 37.8 %; thereby, carrying out the oxidative roasting at this temperature is impractical. Experimental studies have shown that it is possible to effectively remove chlorine from EAF dust which predominantly contains zinc in the form of ZnFe_2O_4 using high-temperature oxidative roasting with relatively low zinc losses in the temperature range of 900 – 1000 °C.

Keywords: EAF dust, electric arc furnace steelmaking, recycling, chlorine, zinc, dechlorination, Waelz oxide, oxidative roasting

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-79-10120, <https://rscf.ru/project/24-79-10120/>.

For citation: Grigor'ev E.V., Kapelyushin Yu.E., Bil'genov A., Stepanov D.V., Khalikulov A.A. Removal of chlorine from electric arc furnace dust by oxidative roasting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(5):543–549. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-543-549>

ВВЕДЕНИЕ

Рост производства и потребления стали характеризуется образованием большого количества техногенных отходов. В среднем на 1 т выплавляемой стали формируется порядка 25 – 30 кг пыли электродугового сталеплавильного производства (ЭДП). В Российской Федерации ежегодно образуется порядка 0,7 млн т пыли, ее складывают в отвалах, теряя при этом железо, цинк и свинец¹ [1; 2]. Хранение подобных отходов представляет угрозу для экосистемы и здоровья людей [3]. Химический состав пыли варьируется в зависимости от применяемой технологии. Содержание цинка колеблется от 2 до 25 %, в некоторых случаях достигая 40 %. Изучение физико-химических закономерностей поведения компонентов пыли с целью извлечения цинка, свинца, железа и удаления хлора является важной задачей современного металлургического производства [4 – 6].

В промышленности для переработки пыли ЭДП чаще всего применяют пирометаллургические методы. Самым распространенным способом является вельц-процесс, на который приходится около 80 % всей перерабатываемой пыли [7]. Пыль ЭДП состоит на 90 % из оксидов, остальные 10 % составляют ферриты, сульфаты и хлориды, включающие в себя хлориды натрия (NaCl) и калия (KCl), а также хлориды цинка и свинца [8]. Одной из серьезных проблем переработки пыли ЭДП является большое количество входящих в ее состав хлоридов. Хлориды в пыли образуются из-за присутствия в ломе хлорсодержащих соединений в виде полимерных изделий, а также лакокрасочных покрытий.

Обжиг является одним из способов удаления загрязняющих веществ из пыли ЭДП. В работах [9; 10] были проведены эксперименты по обжигу пыли в окислительных условиях при температуре 950 °C с дополнительной продувкой воздухом. Согласно результатам, порядка 98 % Pb и Cl и 1 % Zn улетучиваются. В исследованиях [11 – 13] осуществлялся обжиг в разных газовых средах: воздух, CO_2 и SO_2 . Образцы пыли нагревали до температур 200 – 600 °C при времени выдержки 1 – 5 ч. Авторами выбраны низкотемпера-

турные условия ввиду того, что при высоких температурах наблюдаются большие потери по цинку. Наибольшую эффективность показали атмосферы CO_2 или SO_2 . Наименее эффективным оказался обжиг на воздухе. Сульфатизирующий обжиг позволил снизить содержание хлоридов на 83 % (с 70,2 до 12,1 мг/кг). При тех же условиях карбонизирующий обжиг снизил содержание хлоридов на 81 % (с 70,20 до 13,23 мг/кг). В работе [14] осуществляли обжиг пыли ЭДП с добавлением CaO с целью преобразования феррита цинка в оксид цинка. Эксперименты проводились при температуре 1100 °C и времени выдержки 3 ч. Авторами выявлено, что порядка 98 % Cl и Pb удаляется из исходной пыли. В работе [15] обжиг осуществлялся в муфельной печи в интервале температур 300 – 1150 °C. Согласно результатам, при нагревании пыли до 1150 °C содержание натрия и хлора снижается до нуля, при этом содержание калия уменьшается на 81 %, а свинца на 83,5 %. Потери цинка при этом не превышают 5 %. Результаты по удалению хлора обжигом представлены и в работе [16]. Тигли с пылью нагревались со скоростью 300 °C/ч до 900, 1000 и 1100 °C при времени выдержки 240 мин. После обжига содержание хлора в спеке составляло 0,01 – 0,02 % при исходном содержании 3,02 % (степень удаления хлора – 99,6 %). Однако автор не представил объем потерь по цинку.

Таким образом важно отметить, что в литературных источниках имеются противоречивые сведения о степени эффективности окислительного обжига в атмосфере воздуха, в особенности это относится к потерям цинка. Поэтому целью данной работы является дополнительное изучение эффективности окислительного обжига в атмосфере воздуха для удаления хлора из пыли ЭДП при высоких температурах.

ИСХОДНАЯ ПЫЛЬ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе проводилось исследование пыли ЭДП одного из металлургических предприятий. Образец для исследования химического и фазового составов готовился усреднением пробы. Фазовый состав пыли определяли методом РФА (дифрактометр Rigaku Ultima IV). Анализ данных проводили с помощью программного обеспечения Match. Основное содержание фаз, %: ZnFe_2O_4 – 69; ZnO – 6; CaCO_3 – 17; SiO_2 – 5; KCl – 3.

¹ World Steel in Figures. <https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/world-steel-in-figures/> (Accessed 19.03.2025).

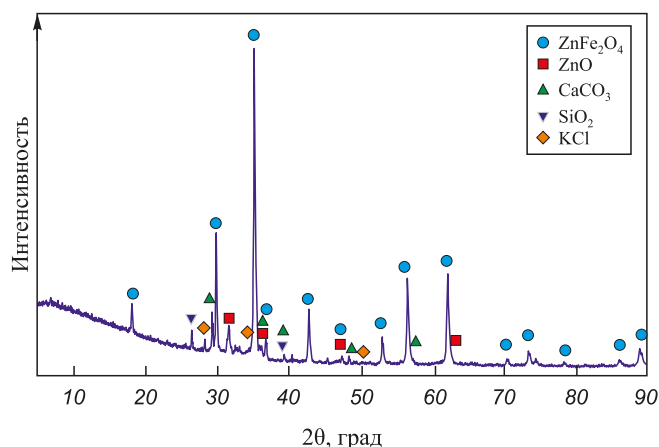


Рис. 1. Фазовый состав исследуемой пыли

Fig. 1. Phase composition of the researched EAF dust

Элементный химический состав исследуемой пыли представлен в табл. 1, 2. Химический состав пыли определяли микрорентгеноспектральным методом на сканирующем электронном микроскопе JSM-7001F фирмы JEOL. Для определения погрешности использовали математические методы. Для сбора статистических данных отбирали девять проб с постоянным перемешиванием из общей емкости с пылью. Для каждой пробы снимали по четыре спектра (метод съемки по области с приближением $100\times$), из 36 спектров получены средние значения интересующих элементов, также просчитан радиус доверительного интервала в программе SPSS. Данные представлены в табл. 1.

Серия экспериментов по обжигу пыли ЭДП производилась в муфельной печи. Каждый образец пыли массой 18 г помещали в корундовый тигель, который загружался в нагретую до нужной температуры печь.

Исследования проводились в интервале температур 300 – 1100 °С при времени выдержки 60 мин в атмосфере воздуха.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена зависимость потери массы образцов от времени и температуры при окислительном обжиге.

Как видно из рис. 2, с повышением температуры наблюдается небольшая тенденция изменения массы образцов в пределах 1 – 3 % в сторону увеличения или уменьшения, что может быть связано с процессами разложения карбонатов, гидроксидов, возгонкой летучих элементов и соединений, а также доокислением металлов до высших оксидов.

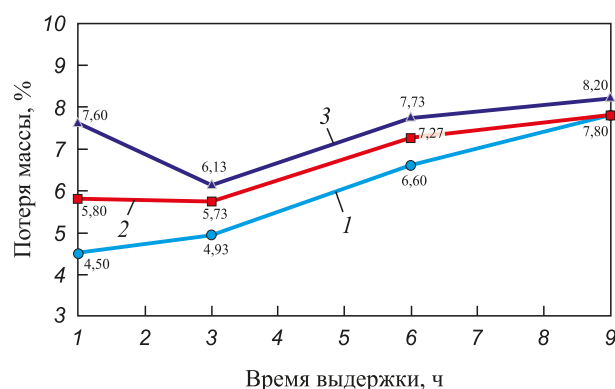
Рис. 2. Зависимость изменения массы образцов от времени и температуры:
1 – 900 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °СFig. 2. Effects of time and temperature on mass change of the EAF dust samples:
1 – 900 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °С

Таблица 1. Состав исследуемой пыли ЭДП (статистические данные, мас. %)

Table 1. Composition of the researched EAF dust (statistical data, wt. %)

Элемент	O	Na	Mg	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
Среднее значение	27,0	2,3	0,8	2,2	0,8	1,8	1,7	3,9	0,5	4,5	40,2	0,5	12,9	1,0
Радиус 95 % доверительного интервала	0,9	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1
Верхняя граница доверительного интервала	27,9	2,8	1,0	2,3	0,9	2,0	1,7	4,1	0,6	4,6	40,9	0,5	13,1	1,1
Нижняя граница доверительного интервала	26,2	1,9	0,7	2,1	0,8	1,7	1,6	3,7	0,5	4,4	39,5	0,4	12,6	0,8

Таблица 2. Средний состав исследуемой пыли ЭДП, мас. %

Table 2. Average composition of the researched EAF dust, wt. %

Элемент	O	Na	Mg	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Сумма
Среднее значение	27,0	2,3	0,8	2,2	0,8	1,8	1,7	3,9	0,5	4,5	40,2	0,5	12,9	1,0	100,0

Таблица 3. Состав пыли после окислительного обжига при различных температурах, мас. %

Table 3. Composition of the EAF dust after oxidative roasting at various temperatures, wt. %

Элемент	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Zn	Итого
Исходная пыль ЭДП	17,7	1,0	0,4	2,8	0,9	1,7	1,8	4,2	0,5	5,6	49,3	14,2	100,0
300 °С	15,8	1,5	0,5	2,4	0,9	1,9	1,8	4,0	0,5	5,3	50,6	14,9	100,0
400 °С	16,5	1,0	0,4	2,6	0,9	1,8	1,9	4,0	0,6	5,3	49,5	15,5	100,0
500 °С	17,6	1,2	0,3	2,7	0,8	1,9	1,7	4,4	0,8	5,3	49,0	14,4	100,0
600 °С	16,3	1,3	0,5	2,6	0,7	2,5	1,8	5,4	0,7	5,0	48,2	15,2	100,0
700 °С	17,3	0,9	0,4	2,5	0,7	2,3	1,8	5,8	0,6	5,6	48,8	13,5	100,0
800 °С	15,8	1,4	0,4	2,5	0,6	2,2	1,7	6,6	0,6	5,3	49,2	13,8	100,0
900 °С	15,8	1,1	0,3	2,4	0,8	1,2	1,2	6,4	0,7	5,5	51,2	13,4	100,0
1000 °С	13,1	0,7	0,4	2,3	0,6	1,6	1,1	6,5	0,8	5,9	55,6	11,4	100,0
1100 °С	16,3	1,5	0,4	3,7	0,7	0,9	0,6	7,1	0,9	5,1	51,4	11,6	100,0

После обжига образцы пыли исследовали на электронном микроскопе. Результаты представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, при увеличении температуры уменьшается количество хлора в образцах пыли. По результатам исследований принято решение о проведении дополнительных экспериментов по высокотемпературному обжигу с переменным временем выдержки с целью оценки влияния времени выдержки на дехлорирование пыли. Образцы массой 10 г помещали в корундовый тигель, затем загружали в муфельную печь. Опыты проводились в интервале температур 900 – 1100 °С. Время выдержки составляло 3, 6 и 9 ч. После обжига образцы исследовались на электронном микроскопе. По результатам экспериментов выявлено, что наибольшая степень дехлорирования составляет порядка 98,9 % при температуре 1100 °С и времени выдержки не менее 6 ч. При выдержке 9 ч получена

близкая степень дехлорирования 96,8 %. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.

После обжига образцы исследовались на электронном микроскопе. В результате установлено, что обжиг при температуре 1100 °С и времени выдержки более 6 ч является нерациональным ввиду увеличения потерь цинка. При температуре 1000 °С потеря цинка составляет около 24,8 %, в то время как при температуре 1100 °С увеличивается до 38,5 %. Полученные данные представлены на рис. 4.

По результатам экспериментов по окислительному обжигу установлено, что повышение температуры и времени выдержки приводит к значительному уменьшению содержания хлора в пыли ЭДП с 1,70 до 0,04 – 0,10 %. Температура является одним из наиболее важных параметров для дехлорирования пыли. Согласно данным, представленным в табл. 3, при температуре 600 °С наблюдается максимальное содержание

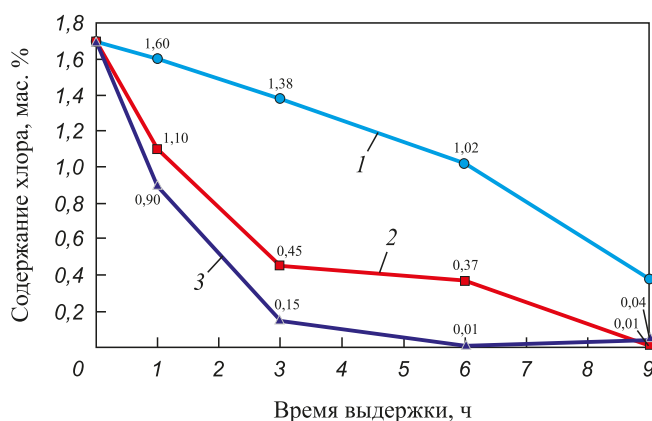


Рис. 3. Зависимость содержания хлора в пыли ЭДП от времени и температуры при окислительном обжиге на воздухе: 1 – 900 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °С

Fig. 3. Effects of time and temperature on Cl content in the EAF dust samples during oxidative roasting in air atmosphere: 1 – 900 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °С

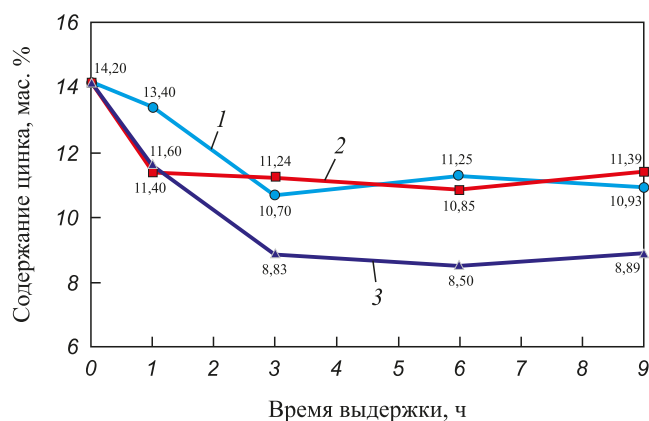


Рис. 4. Зависимость содержания цинка в пыли ЭДП от времени и температуры при окислительном обжиге на воздухе: 1 – 900 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °С

Fig. 4. Effects of time and temperature on Zn content in the EAF dust samples during oxidative roasting in air atmosphere: 1 – 900 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °С

Таблица 4. Степень удаления хлора и потери цинка при различных температурах и времени выдержки, %

Table 4. Degree of chlorine removal and zinc loss at different temperatures and roasting time, %

Время обжига, ч	Температура, °C					
	900		1000		1100	
	удаление Cl	потери Zn	удаление Cl	потери Zn	удаление Cl	потери Zn
1	5,8	5,6	35,3	19,7	47,0	18,3
3	18,8	24,6	73,5	20,8	91,1	37,8
6	40,0	20,7	78,2	23,6	99,4	40,1
9	77,6	23,0	97,6	19,8	99,4	37,4

хлора 2,5 мас. %, что может быть связано с его минимальным удалением, а также разложением гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и карбоната кальция CaCO_3 . Указанная температура находится в диапазоне разложения данных соединений. Отмечено повышение концентрации всех элементов в пыли. Однако для подтверждения вопроса разложения гидроксидов и карбонатов требуется проведение дополнительных исследований в области превращения фаз при нагреве. В температурном диапазоне от 700 до 1100 °C наблюдается снижение содержания хлора с 2,5 до 0,9 мас. %, эти показатели подтверждаются литературными данными [15; 17 – 19]. В работе проводились дополнительные эксперименты с целью изучения времени выдержки в температурном диапазоне 900 – 1100 °C. Время выдержки варьировалось от 1 до 9 ч с интервалом 3 ч. Согласно данным, приведенным на рис. 3, 4, потери хлора и цинка с увеличением времени выдержки возрастают. В табл. 4 представлены показатели по степени удаления хлора и потерям цинка.

Таким образом, при температуре обжига 1000 °C и времени выдержки 3 ч степень удаления хлора составляет 73,5 %, а потери цинка остаются в пределах 20,8 %. При выдержке 9 ч удаление хлора практически завершается, достигая 97,4 %, при этом потери цинка находятся в пределах 19,8 %. При температуре обжига 1100 °C и времени выдержки 3 ч степень удаления хлора составляет 91,2 %, а потери цинка значительно увеличиваются, достигая 37,8 %. При выдержке 6 ч процесс удаления хлора фактически завершается, достигая 99,4 %, с потерями цинка приблизительно на том же высоком уровне в пределах 40,1 %.

Выводы

Литературные данные имеют противоречивые сведения о рациональности проведения высокотемпературного окислительного обжига ввиду потерь по цинку. Однако проведение экспериментальных исследований показало, что из пыли ЭДП, в которой цинк преимущественно содержится в виде ZnFe_2O_4 , возможно осуществить эффективное удаление хлора. Основными параметрами, влияющими на эффективность удаления

хлора, являются температура обжига и время выдержки. Максимальная эффективность достигается при температурах выше 900 °C и времени выдержки в печи больше 3 ч. При температуре 1000 °C и времени выдержки 9 ч наблюдается полное удаление хлора, при этом потери цинка могут достичь 20 мас. %.

Таким образом, метод высокотемпературного окислительного обжига при некоторой оптимальной температуре 900 или 1000 °C (чтобы не допустить больших потерь по цинку) может рассматриваться эффективной мерой дехлорирования пыли ЭДП и интегрироваться в существующее металлургическое производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Леонтьев Л.И., Дюбанов В.Г. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды. *Экология и промышленность России*. 2011;(4):32–35.
Leont'ev L.I., Dyubanov V.G. Technogenic wastes of ferrous and non-ferrous metallurgy and environmental problems. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2011;(4):32–35. (In Russ.).
2. Адилов Г., Карева Н.Т., Рошин В.Е. Влияние меди и кремния на фазовые превращения в системе железо – углерод. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(1):73–75.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-73-75>
Adilov G., Kareva N.T., Roshchin V.E. Influence of copper and silicon on phase transformations in the iron – carbon system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(1):73–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-73-75>
3. Конакова А.Г., Осипова Е.А. Распространенность соединений цинка в окружающей среде и их роль для живых организмов. *Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2023*. 2023:4384–4387.
4. Адилов Г., Поволоцкий А.Д., Рошин В.Е. Термодинамическое моделирование восстановления металлов в медеплавильных шлаках и экспериментальная проверка результатов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(8):581–589.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-581-589>
Adilov G., Povolotskii A.D., Roshchin V.E. Thermodynamic modeling of metal reduction in copper-smelting slags and

- experimental verification of its results. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(8):581–589. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-581-589>
5. Martins F.M., dos Reis Neto J.M., da Cunha C.J. Mineral phases of weathered and recent electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;154(1–3):417–425.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.041>
 6. Симонян Л. М., Демидова Н. В. Исследование процесса безуглеродного селективного извлечения цинка и свинца из пыли ДСП. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(8):631–638.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-631-638>
Simonyan L.M., Demidova N.V. Selective extraction of carbon-free zinc and lead from EAF-dust. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(8):631–638. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-631-638>
 7. Рязанов А.Г., Корягин Ю.Д. Влияние режимов термообработки на фазовый состав цинкосодержащих материалов: выпускная квалификационная работа. 2017:14–16.
 8. Григорьев Е.В., Капелюшин Ю.Е. Изготовление, сушка и механические испытания брэксов из пыли электродугового сталеплавильного производства. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2023;79(4):334–339.
Grigor'ev E.V., Kapelyushin Yu.E. Manufacturing, curing and mechanical testing of BREX from electric arc furnace dust. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2023;79(4):334–339. (In Russ.).
 9. Стовпченко А.П., Камкина Л.В., Пройдак Ю.С., Дервянченко И.В., Кучеренко О.Л., Бондаренко М.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования состава и восстановимости пыли дуговых сталеплавильных печей. *Электрометаллургия*. 2009;(8):29–36.
Stovpchenko A.P., Kamkina L.V., Proidak Yu.S., Dervyanchenko I.V., Kucherenko O.L., Bondarenko M.Yu. Theoretical and experimental studies of composition and reducibility of dust of arc steelmaking furnaces. *Electrometallurgy*. 2009;(8):29–36. (In Russ.).
 10. Доронин И.Е. Промышленные способы переработки сталеплавильной пыли. *Металлург*. 2010;(10):48–53.
Doronin I.E. Industrial methods of steelmaking dust processing. *Metallurg*. 2010;(10):48–53. (In Russ.).
 11. Yoo J.M., Kim B.S., Lee J.C., Kim M.S., Nam C.W. Kinetics of the volatilization removal of lead in electric arc furnace dust. *Materials Transactions*. 2005;46(2):323–328.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.46.323>
 12. Zhu F., Takaoka M., Oshita K., Kitajima Y., Inada Y., Morisawa S., Tsuno H. Chlorides behavior in raw fly ash washing experiments. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;178(1–3):547–552.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.119>
 13. Chen W.S., Shen Y.H., Tsai M.S., Chang F.C. Removal of chloride from electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;190(1–3):639–644.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.096>
 14. Chairaksa-Fujimoto R., Inoue Y., Umeda N., Itoh S., Nagasaka T. New pyrometallurgical process of EAF dust treatment with CaO addition. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2015;22:788–797.
<https://doi.org/10.1007/s12613-015-1135-6>
 15. Якорнов С.А. Технология переработки цинкосодержащих пылей дуговых сталеплавильных печей с получением цинкового порошка: Диссертация ... кандидата технических наук. 2024:81–82,90,93.
 16. Chen W.S., Chou W.S., Wu C.C., Tsai M.S. Removal of chloride from EAF-dust by reactive roasting at low temperature. *100th Annual Conf. and Exhibition of the Air and Waste Management Association 2007*. ACE 2007, Air and Waste Management Association; 2007.
 17. Симонян Л.М., Демидова Н.В. Изучение поведения диоксинов и фуранов в процессе удаления цинка и свинца из пыли ДСП. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(11):840–845.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-840-845>
Simonyan L.M., Demidova N.V. Dioxins and furans' behavior in the process of zinc and lead removing from EAF dust. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(11):840–845. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-840-845>
 18. Демин А.В., Рожков А.И., Грудницкий О.М., Николаев В.В., Феклистов А.В. Поиск способов утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на Белорусском металлургическом заводе. *Вестник КИГИТ*. 2014;2(44):40–49.
Demin A.V., Rozhkov A.I., Grudnitskii O.M., Nikolaev V.V., Feklistov A.V. Finding ways of recycling dust of arc steel furnaces at the Belarusian metallurgic plant. *Vestnik KIGIT*. 2014;2(44):40–49. (In Russ.).
 19. Leclerc N., Meux E., Lecuire J.M. Hydrometallurgical recovery of zinc and lead from electric arc furnace dust using mononitritotriacetate anion and hexahydrated ferric chloride. *Journal of Hazardous Materials*. 2002;91(1–3):257–270.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00394-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00394-6)

Сведения об авторах

Information about the Authors

Евгений Вячеславович Григорьев, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет

E-mail: grigorev@susu.ru

Юрий Евгеньевич Капелюшин, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет

ORCID: 0000-0002-3352-1780

E-mail: kapelyshnye@susu.ru

Evgenii V. Grigor'ev, Research Engineer of the Research Laboratory "Hydrogen Technologies in Metallurgy", South Ural State University

E-mail: grigorev@susu.ru

Yury E. Kapelyushin, Senior Researcher of the Research Laboratory "Hydrogen Technologies in Metallurgy", South Ural State University

ORCID: 0000-0002-3352-1780

E-mail: kapelyshnye@susu.ru

Арман Бильгенов, старший преподаватель кафедры «Пирометаллургические и литейные технологии», Южно-Уральский государственный университет
ORCID: 0009-0001-8592-7870
E-mail: bilgenova@susu.ru

Дмитрий Владимирович Степанов, инженер-исследователь управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет
E-mail: aqaseq@gmail.com

Артур Алексеевич Халикулов, лаборант управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет
E-mail: artur.dragonil@mail.ru

Arman Bil'genov, Senior Lecturer of the Chair "Pyrometallurgical and Foundry Technologies", South Ural State University
ORCID: 0009-0001-8592-7870
E-mail: bilgenova@susu.ru

Dmitrii V. Stepanov, Research Engineer of Department of Scientific and Innovation Activities, South Ural State University
E-mail: aqaseq@gmail.com

Artur A. Khalikulov, Laboratory Assistant of Department of Scientific and Innovation Activities, South Ural State University
E-mail: artur.dragonil@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Е. В. Григорьев – проведение исследований, обработка данных, написание статьи.

Ю. Е. Капелюшин – научное руководство, написание статьи, редактирование статьи.

А. Бильгенов – редактирование статьи, анализ литературных данных.

Д. В. Степанов – проведение экспериментов, написание статьи, подготовка литературного обзора.

А. А. Халикулов – проведение экспериментов.

E. V. Grigor'ev – conducting the research, data processing, writing the text.

Yu. E. Kapelyushin – scientific guidance, writing and editing the text.

A. Bil'genov – editing the text, analysis of literary data.

D. V. Stepanov – conducting the experiments, writing the text, preparing a literary review.

A. A. Khalikulov – conducting the experiments.

Поступила в редакцию 20.05.2025

После доработки 27.06.2025

Принята к публикации 29.08.2025

Received 20.05.2025

Revised 27.06.2025

Accepted 29.08.2025