

По материалам конференции
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»
им. академика А.М. Самарина – 2022

Materials of the Conference
«PHYSICO-CHEMICAL FOUNDATIONS
OF METALLURGICAL PROCESSES»
named after Academician A.M. Samarin – 2022



УДК 669.187.2: 628.511/.512: 504.05

DOI 10.17073/0368-0797-2023-3-344-355



Оригинальная статья
Original article

ИЗУЧЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ СВИНЦА И ЦИНКА ИЗ ПЫЛИ ДСП ПРИ НАГРЕВЕ В ПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТОКЕ АРГОНА

Н. В. Подусовская^{1,2}✉, О. А. Комолова^{1,2}, К. В. Григорович^{1,2},
А. В. Павлов², В. В. Аксенова², Б. А. Румянцев¹, М. В. Железный^{1,2}

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 49)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

✉ ndemidova_n@mail.ru

Аннотация. Изучены элементный и фазовый составы пыли дуговой сталеплавильной печи ПАО «Северсталь», проведено термодинамическое моделирование процесса селективного извлечения цинка и свинца из пыли. Определены возможные механизмы его протекания. Выполнен нагрев электросталеплавильной пыли в диапазоне температур 20 – 1300 °С в вакуумной печи сопротивления и печи Таммана в токе аргона. Эксперименты в вакуумной печи сопротивления с линейным нагревом показали, что удаление свинца и цинка из образца протекало в интервале температур 800 – 1200 °С. При этом скорость удаления свинца была выше. Интенсивное удаление свинца наблюдали при температурах свыше 1000 °С, а интенсивное удаление цинка при температурах свыше 1200 °С. Уточняющие изотермические эксперименты, выполненные в печи Таммана, показали, что полный переход свинца в газовую фазу достигался при температуре 1100 °С (время выдержки 12 мин) и при температуре 1200 °С (время выдержки 6 мин и более). Параллельно с этим наблюдали удаление цинка в количестве 14,4 и 32,2 % (отн.) соответственно, что позволило сделать вывод о возможности последовательного получения двух продуктов: смеси свинца с цинком и цинка, не загрязненного свинцом. При сопоставлении экспериментальных данных и данных термодинамического моделирования определены реакции, протекание которых наиболее вероятно при восстановлении свинец- и цинксодержащих фаз углеродом.

Ключевые слова: черная металлургия, цветные металлы, сталеплавильная пыль, пыль ДСП, безуглеродный процесс, селективное извлечение, испарение, цинк, свинец, железо, вторичные ресурсы, ресурсосбережение

Для цитирования: Подусовская Н.В., Комолова О.А., Григорович К.В., Павлов А.В., Аксенова В.В., Румянцев Б.А., Железный М.В. Изучение селективного извлечения свинца и цинка из пыли ДСП при нагреве в печах сопротивления в токе аргона. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(3):344–355. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-344-355>

LEAD AND ZINC SELECTIVE EXTRACTION FROM EAF DUST WHILE HEATING IN RESISTANCE FURNACE WITH FLOWING ARGON

N. V. Podusovskaya^{1,2}✉, O. A. Komolova^{1,2}, K. V. Grigorovich^{1,2},
A. V. Pavlov², V. V. Aksenova², B. A. Rumyantsev¹, M. V. Zheleznyi^{1,2}

¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

² National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

✉ ndemidova_n@mail.ru

Abstract. The elemental and phase compositions of electric arc furnace (EAF) dust from PJSC Severstal were studied. We carried out the thermodynamic modeling of zinc and lead selective extraction process and determined its possible mechanisms. EAF dust was heated in the temperature range

of 20 – 1300 °C in vacuum resistance furnace and the Tamman furnace with flowing argon. Experiments in the vacuum resistance furnace with linear heating showed that lead and zinc removal from the sample occurs in the temperature range of 800 – 1200 °C, with higher lead removal rate. Intensive lead removal was observed at temperature above 1000 °C, while intensive zinc removal occurs at temperature above 1200 °C. Clarifying isothermal experiments performed in the Tamman furnace showed that lead complete transition to the gas phase was achieved at a temperature of 1100 °C (holding time – 12 min) and at a temperature of 1200 °C (holding time – 6 min or more). At the same time, zinc removal was observed in the amount of 14.4 % ratio and 32.2 % ratio, respectively, which allows us to conclude that it is possible to consistently obtain two products: lead and zinc mixture and zinc not contaminated with lead. When comparing experimental and thermodynamic modeling data, the reactions that are most likely to occur during the carbon reduction of lead- and zinc-containing phases were determined.

Keywords: ferrous metallurgy, non-ferrous metals, steel dust, electric-arc furnace dust, EAF-dust, carbon-free process, selective extraction, evaporation, zinc, lead, iron, secondary resources, resource saving

For citation: Podusovskaya N.V., Komolova O.A., Grigorovich K.V., Pavlov A.V., Aksenova V.V., Rumyantsev B.A., Zheleznyi M.V. Lead and zinc selective extraction from EAF dust while heating in resistance furnace with flowing argon. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(3):344–355. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-344-355>

ВВЕДЕНИЕ

Пыль электросталеплавильного производства, накопленная в отвалах металлургических предприятий, содержит цинк (как правило, 15 – 25 %) и свинец (до 3 %), что в условиях ограниченного промышленного запаса цинковых и свинцовых руд¹, наряду с низким содержанием в них цинка и свинца, остро ставит вопрос о разработке технологий селективного извлечения цветных металлов из пыли дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Их переработка не только позволит вернуть цинк, свинец и железо в металлургическое производство, но и приведет к высвобождению значительных территорий, в настоящий момент занятых токсичными отходами [1].

Как правило, цинк и свинец находятся в пыли электросталеплавильных печей в оксидной форме, что объясняется окислительным характером сталеплавильного процесса. Однако в пылегазовом потоке высока вероятность образования комплексных оксидов, например, феррита цинка $ZnFe_2O_4$ [2 – 4]. В свою очередь, значительные отличия химического состава перерабатываемых в ДСП материалов приводят к колебаниям как химического, так и фазового составов электросталеплавильной пыли, что требует их постоянного учета при утилизации металлургической пыли и усложняет технологию утилизации пыли ДСП [5].

В связи с этим, селективное извлечение свинца и цинка из электросталеплавильной пыли, как правило, реализуется способами гидрометаллургии [6; 7] или комплексными пиро-гидрометаллургическими способами [4; 8; 9]. Однако технологический процесс гидрометаллургического производства довольно сложный, связанный со значительными технологическими переделами с использованием больших количеств химических реагентов, перегретого пара и горячей воды, энергоемкого оборудования, что является небезопасным для окружающей среды. В процессе производства на многих технологических участках имеют место плохо регули-

руемые и нерегулируемые сбросы отработанных реагентов, тепло- и энергоносителей, отходов производства и побочных продуктов [10; 11]. В этой связи видится целесообразным поиск пирометаллургического способа переработки электросталеплавильной пыли, обеспечивающий селективное извлечение свинца и цинка.

Анализ состояния исследований по проблеме утилизации токсичной пыли ДСП показывает, что основные исследования проводятся в рамках традиционных представлений с использованием избытка восстановителей (углерода) для снижения температуры начала восстановления цинка и других металлов, что делает невозможным их селективное извлечение в процессе восстановления.

Кроме этого, необходимость снижения промышленного потребления углерода для сокращения выбросов CO_2 является одной из основных задач стран БРИКС [12]. В частности, согласно источникам^{2, 3}, в России планируются следующие меры госрегулирования выбросов парниковых газов:

- введение обязательной углеродной отчетности;
- установка целевых показателей для предприятий;
- сборы (штрафы) за превышение объемов выбросов;
- запуск механизма углеродной торговли;
- технологическая модернизация производства.

Все это на государственном уровне накладывает ограничения на использование металлургических технологий, сопровождающихся значительной эмиссией парниковых газов, что требует разработки технологии селективного извлечения свинца и цинка из электросталеплавильной пыли без внесения дополнительного восстановителя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – электросталеплавильная пыль ПАО «Северсталь». Содержание элементов, % (по

¹ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/74a/GD_msb-2020.pdf (дата обращения 11.05.2023).

² Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (дата обращения 11.05.2023).

³ Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/00012021101010022> (дата обращения 11.05.2023).

массе): 41,4 Fe; 14,5 Zn; 6,2 Ca; 2,5 Mn; 1,7 Cl; 1,74 C; 1,3 Si; 1,0 K; 1,0 Pb; 0,74 S; 0,2 Cr; 0,2 Cu; 0,1 Ti. Остальное в образце, предположительно, кислород. Определение содержания элементов в диапазоне от Na до U осуществляли на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрокане МАКС-GVM. Принцип действия рентгеновского спектрометра основан на облучении образца первичным излучением рентгеновской трубки, измерении интенсивности вторичного флуоресцентного излучения от образца на длинах волн, соответствующих определяемым элементам, и последующем расчете массовой доли этих элементов по методу фундаментальных параметров. Пробы предварительно готовили: для сыпучих образцов – измельчали, усредняли, смешивали со связующим (полиакриламид, 0,2 % (по массе) сверх навески), увлажняли, формировали в виде невысокого цилиндра ($D = 7$ мм, $h = 2 - 3$ мм) и высушивали; для твердых образцов готовили шлифы.

Содержание углерода и серы в образце определяли на приборе Leco CS 600 методом высокотемпературной экстракции в несущем газе. Определение содержания углерода и серы основано на сжигании навески пробы в токе кислорода (99,998 %) в присутствии специальных флюсов и определении количества образовавшихся диоксида углерода (CO_2) и диоксида серы (SO_2).

В работе определен фазовый состав пыли ДСП методом рентгенодифракционного анализа (XRD). Содержание фаз, % (по массе): 78,2 Fe_3O_4 ; 4,4 $(Zn, Mn, Fe)_3O_4$; 6,0 ZnO; 4,5 $Ca_2Fe_2O_5$; 3,0 MnO_2 ; 2,7 Pb_2O_3 ; 1,2 SiO_2 . Поскольку структуры магнетита и шпинели практически идентичны, следует рассматривать их как совокупную фазу.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Выдвинута гипотеза, что протекание селективного восстановления свинца из электросталеплавильной пыли обеспечивает недостаток восстановителя. Например, в работе [13] показано, что селективное восстановление свинца в условиях шахтной восстановительной плавки свинцового агломерата может быть достигнуто при недостатке монооксида углерода в качестве восстановителя (содержание CO не более 60 %). В ряде работ [14; 15] рассматривали аналогичное влияние твердого углерода на восстановление свинецсодержащих техногенных отходов. При содержании углерода свыше 3 % наблюдали совместное восстановление свинца и цинка из пыли ДСП. При содержании углерода свыше 3,7 % усложняется селективность восстановления свинца из пыли плавки меди.

Для выявления условий, позволяющих проводить селективное извлечение цинка и свинца из электросталеплавильной пыли, необходимо определить температуры перехода в газовую фазу обнаруженных в пыли соединений цинка и свинца.

Согласно данным работы [16], программа HSC Chemistry 6 успешно используется исследователями для оценки термодинамических параметров, а результаты моделирования сопоставимы с экспериментальными данными. С помощью программы HSC Chemistry 6, расчетные модули которой используют обширную термодинамическую базу данных по энтальпиям (H), энтропиям (S) и теплоемкостям реакций (C_p), выполнен расчет изменения энергии Гиббса, позволяющий определить термодинамические температуры протекания реакций ($\Delta G < 0$). Рассмотрены реакции восстановления, термической диссоциации и испарения выявленных свинец- и цинксодержащих фаз, и реакций восстановления оксидов железа и марганца.

Реакции восстановления оксида свинца (III), сопровождающиеся переходом свинца и его соединений в газовую фазу, представлены в табл. 1. При термодинамическом моделировании давление монооксида углерода (здесь и далее) приняли равным 1 атм.

Согласно данным табл. 1, восстановление оксида свинца (III), сопровождающееся переходом свинца в газовую фазу, с учетом термодинамики начинается с температуры не более 877 °С.

Реакции восстановления оксида цинка, сопровождающиеся переходом цинка в газовую фазу, представлены в табл. 2.

Согласно данным табл. 2, восстановление оксида цинка с учетом термодинамики начинается с температуры выше 958 °С. При этом в работах [17 – 19] показано, что восстановление цинка из пыли ДСП успешно протекает в интервале температур 925 – 1300 °С при избыточном количестве восстановителя.

Реакции восстановления углеродом и монооксидом углерода при нагреве шпинели $(Zn, Mn, Fe)_3O_4$ сложного состава рассмотрены на примере феррита

Таблица 1

Химические реакции восстановления оксида свинца (III), сопровождающиеся переходом свинца и его соединений в газовую фазу, и температуры их протекания

Table 1. Lead (III) oxide reduction chemical reactions with their course temperatures, resulting in lead and its compounds transition into the gas phase

Номер реакции	Реакция	Температура протекания реакции, °С
1	$Pb_2O_3 + 3C = 2Pb_{(r)} + 3CO_{(r)}$	>449
2	$Pb_2O_3 + 1,5C = 2Pb_{(r)} + 1,5CO_{2(r)}$	>295
3	$Pb_2O_3 + 3CO_{(r)} = 2Pb_{(r)} + 3CO_{2(r)}$	0 – 2000
4	$Pb_2O_3 + C = 2PbO_{(r)} + CO_{(r)}$	>809
5	$2Pb_2O_3 + C = 4PbO_{(r)} + CO_{2(r)}$	>835
6	$Pb_2O_3 + CO_{(r)} = 2PbO_{(r)} + CO_{2(r)}$	>877

Т а б л и ц а 2

Химические реакции восстановления оксида цинка, сопровождающиеся переходом цинка в газовую фазу, и температуры их протекания

Table 2. Zinc oxide reduction chemical reactions with their course temperatures, resulting in zinc transition into the gas phase

Номер реакции	Реакция	Температура протекания реакции, °С
7	$ZnO + C = Zn_{(r)} + CO_{(r)}$	>958
8	$2ZnO + C = 2Zn_{(r)} + CO_{2(r)}$	>1064
9	$ZnO + CO_{(r)} = Zn_{(r)} + CO_{2(r)}$	>1326

цинка $ZnFe_2O_4$ (франклинит). Реакции восстановления франклинита, начинающиеся в интервале температур 0 – 1326 °С, представлены в табл. 3.

Для реакций 4 – 7, 10 – 12 наблюдаются близкие температуры начала восстановления свинец- и цинксо-держащих фаз, что требует точного подбора температуры и состава газовой фазы для регулирования процесса селективного извлечения свинца и цинка из пыли ДСП.

Поскольку шпинель $(Zn, Mn, Fe)_3O_4$, обнаруженная в пыли ДСП, отсутствует в базе данных HSC Chemistry 6, для оценки возможности ее восстановления углеродом или монооксидом углерода рассмотрены возможные реакции восстановления соединений – оксидов железа и марганца (Fe_3O_4 и Mn_3O_4). Реакции, протекающие в интервале температур 295 – 1400 °С, представлены в табл. 4.

В соответствии с табл. 4, реакции 15 – 25 могут протекать совместно с восстановлением оксида свинца (III).

Поскольку переход цинксо-держащих фаз в газовую фазу будет проходить после восстановления свинца (а, возможно, и других компонентов пыли ДСП), есть

вероятность, что углерод, содержащийся в пыли, полностью израсходуется на другие компоненты. Поэтому без внесения дополнительного восстановителя механизмом перехода цинка в газовую фазу будет реакция термической диссоциации оксида цинка (табл. 5).

Температура протекания реакции 26 слишком высока для промышленных условий. Снизить температуру начала реакции термической диссоциации можно за счет снижения парциального давления образующихся газов при добавлении аргона. В подтверждение, для реакции термического разложения оксида цинка выполнено термодинамическое моделирование равновесного состава в программной системе для моделирования фазового и химического равновесия «Тerra» [20]. Зависимость температуры протекания реакции $ZnO = Zn_{(r)} + O_{2(r)}$ от парциального давления $Zn_{(r)}$ представлена на рис. 1.

В соответствии с рис. 1, снижение парциального давления $Zn_{(r)}$ (за счет внесения аргона в систему) позволит снизить диапазон температур термического разложения оксида цинка с 1970 до 1300 °С.

Теоретически, аналогичным образом можно снизить температуру начала восстановления оксида свинца (III), чтобы расширить диапазон селективного извлечения свинец- и цинксо-держащих фаз.

Определено, что селективное извлечение свинца и цинка из электросталеплавильной пыли возможно двумя способами (температуры приведены без учета добавления в систему инертного газа):

– последовательное восстановление углеродом или монооксидом углерода свинец- (295 – 877 °С) и цинксо-держащих фаз (794 – 1326 °С);

– восстановление углеродом или монооксидом углерода свинецсо-держащих фаз (295 – 877 °С) и термическая диссоциация цинксо-держащих фаз (1970 °С).

Необходимость изучения механизма последовательного восстановления свинец- и цинксо-держащих фаз из пыли ДСП связана с тем, что протекание процесса при более низких температурах предпочтительнее. Это

Т а б л и ц а 3

Химические реакции восстановления франклинита и температуры их протекания

Table 3. Franklinite reduction chemical reactions and their course temperatures

Номер реакции	Реакция	Температура протекания реакции, °С
10	$ZnFe_2O_4 + CO_{(r)} = ZnO + 2FeO + CO_{2(r)}$	>838
11	$ZnFe_2O_4 + 4C = Zn_{(r)} + 2Fe + 4CO_{(r)}$	>794
12	$ZnFe_2O_4 + 2C = Zn_{(r)} + 2Fe + 2CO_{2(r)}$	>863
13	$ZnFe_2O_4 + 3CO_{(r)} = ZnO + 2Fe + 3CO_{2(r)} + ZnO + CO_{(r)} = Zn_{(r)} + CO_{2(r)} = \sum ZnFe_2O_4 + 2CO_{(r)} = Zn_{(r)} + 2FeO + 2CO_{2(r)}$	>1126
14	$ZnFe_2O_4 + CO_{(r)} = ZnO + 2FeO + CO_{2(r)} + ZnO + C = Zn_{(r)} + CO_{(r)} = \sum ZnFe_2O_4 + C = Zn_{(r)} + 2FeO + CO_{2(r)}$	>905

Таблица 4

Химические реакции восстановления оксидов Fe₃O₄ и Mn₃O₄ и температуры их протекания

Table 4. Fe₃O₄ and Mn₃O₄ reduction chemical reactions and their course temperatures

Номер реакции	Реакция	Температура протекания реакции, °С
15	Fe ₃ O ₄ + C = 3FeO + CO _(г)	>700
16	2Fe ₃ O ₄ + C = 6FeO + CO _{2(г)}	>694
17	Fe ₃ O ₄ + CO _(г) = 3FeO + CO _{2(г)}	>514
18	FeO + C = Fe + CO _(г)	>725
19	2FeO + C = 2Fe + CO _{2(г)}	>751
20	FeO + CO _(г) = Fe + CO _{2(г)}	<579
21	Fe ₃ O ₄ + C = Fe ₂ O ₃ + Fe + CO _(г)	>941
22	Mn ₃ O ₄ + C = 3MnO + CO _(г)	>277
23	2Mn ₃ O ₄ + C = 6MnO + CO _{2(г)}	0 – 2000
24	Mn ₃ O ₄ + CO _(г) = 3MnO + CO _{2(г)}	0 – 2000
25	MnO + C = Mn + CO _(г)	>1397

Таблица 5

Химическая реакция термической диссоциации оксида цинка и температура ее протекания

Table 5. Zinc oxide thermal dissociation chemical reaction and its course temperature

Номер реакции	Реакция	Температура протекания реакции, °С
26	2ZnO = 2Zn _(г) + O _{2(г)}	>2118

позволит снизить энергозатраты на протекание процесса и вести его без образования расплава.

Однако температуры реального процесса могут существенно отличаться от расчетных. Для определения фактических температур селективного извлечения свинца и цинка из пыли ДСП выполнены экспериментальные исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования поведения цинка и свинца при нагреве пыли ДСП в интервале температур 20 – 1300 °С выполняли в вакуумной печи сопротивления (нагрев образцов с постоянной скоростью) и печи Таммана (изотермические условия) в токе аргона. Перед началом эксперимента проведен холостой опыт, доказывающий, что потеря массы тигля не влияет на результат измерения массы образца.

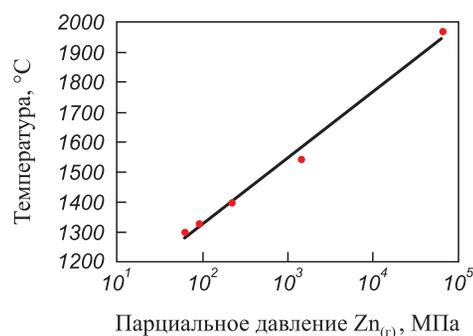


Рис. 1. Зависимость температуры протекания реакции ZnO = Zn_(г) + O_{2(г)} от парциального давления Zn_(г)

Fig. 1. Dependence of ZnO = Zn_(g) + O_{2(g)} reaction temperature on Zn_(g) partial pressure

Температуру в печи контролировали термопарой ВР(А) 5/20, расположенной в изотермической зоне печи с внутренней стороны нагревателя в пустом тигле.

После охлаждения образцов выполняли измерение массы образцов и исследовали их химический состав.

Содержание углерода и серы в образцах определяли на приборе Лесо CS 600 методом высокотемпературной экстракции в несущем газе. Определение содержания элементов в диапазоне от Na до U осуществляли на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрокане МАКС-GVM.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Обработку электросталеплавильной пыли из рукавных фильтров проводили в вакуумной печи сопротивления (рис. 2) с графитовым нагревателем (D = 65 мм, L = 300 мм) в диапазоне температур 20 – 1300 °С. Характеристики печи: P = 20 кВт; U = 10 В; I = 2000 А; f = 50 Гц. Печь оснащена системой водоохлаждения.

Навеску пыли массой 3 г укладывали в тонкостенный алундовый тигель (D = 19 мм, d = 18 мм, H = 40 мм, h = 38,5 мм). Высота слоя составляла 1,25 – 1,5 см. Семь тиглей (общая масса навески 21 г) устанавливали в изотермическую зону печи, затем из камеры печи откачивали воздух форвакуумным насосом до остаточного давления 10⁻¹ Па и заполняли ее аргоном марки «ВЧ».

Далее открывали сброс газа в атмосферу и устанавливали расход аргона 0,5 л/мин. После этого включали нагрев печи со скоростью 15 °С/мин (нагрев на 100 °С осуществляется за ~7 мин). По достижении требуемой температуры (800, 1000, 1100, 1200, 1300 °С) доставали из печи 1 – 2 тигля с продуктами плавки и охлаждали на воздухе.

Внешний вид образцов до и после обработки в печи представлен на рис. 3. После нагрева наблюдали потемнение образцов, предположительно это связано с частичным восстановлением магнетита. Образцы, обработанные при 800 и 1000 °С, рассыпались при лег-

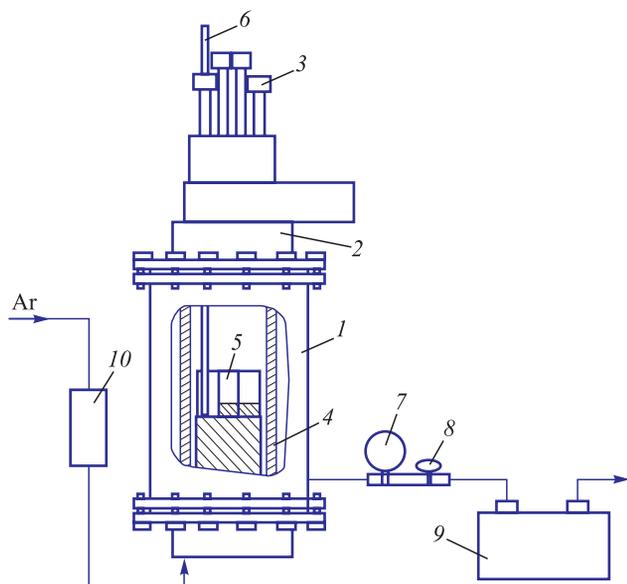


Рис. 2. Схема вакуумной печи сопротивления:
 1 – корпус печи; 2 – крышка печи; 3 – смотровое окно;
 4 – графитовый нагреватель; 5 – рабочие алундовые тигли;
 6 – термопара ВР 5/20; 7 – манометр; 8 – вентиль вакуумной системы; 9 – вакуумный насос; 10 – ротаметр

Fig. 2. Scheme of vacuum resistance furnace:
 1 – furnace body; 2 – furnace lid; 3 – observation hole;
 4 – graphite heater; 5 – working alund crucibles; 6 – BP 5/20 thermocouple; 7 – monometer; 8 – vacuum system valve;
 9 – vacuum pump; 10 – rotameter

ком касания, при 1100 и 1200 °С с небольшим усилием измельчались в ступке. Нагрев до 1300 °С приводил к образованию расплава.

После охлаждения осуществляли измерение массы образцов и исследовали их химический состав. Фактическая убыль массы навески после нагрева представлена в табл. 6. Было отмечено, что потеря массы при температуре 1200 °С и больше существенно выше.

Содержание свинца, цинка (определяли на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектро-

Таблица 6

Фактическая убыль массы навески пыли ДСП после нагрева в вакуумной печи сопротивления в токе аргона

Table 6. Actual EAF dust mass decrease after heating in the vacuum resistance furnace with flowing argon

Температура выдержки, °С	Фактическая убыль массы, % (отн.)
800	2,32
1000	3,64
1100	4,28
1200	10,04*
1300	21,49*

* Усреднено по двум образцам

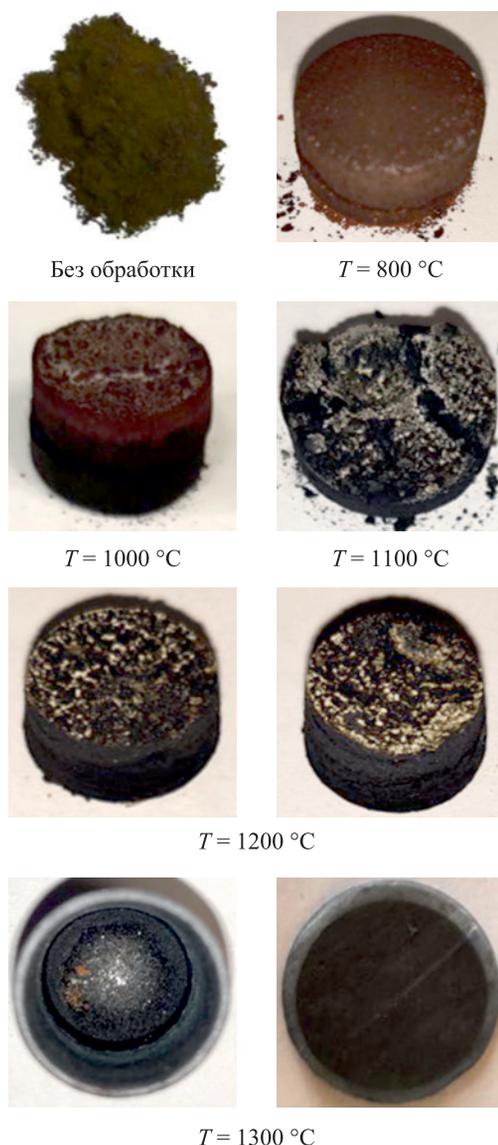


Рис. 3. Внешний вид образцов до и после обработки в вакуумной печи сопротивления

Fig. 3. Appearance of the samples before and after treatment in the vacuum resistance furnace

скане МАКС-GVM) и углерода (определяли на приборе Лесо CS 600 методом высокотемпературной экстракции в несущем газе) в пыли ДСП после нагрева в вакуумной печи сопротивления в токе аргона представлено в табл. 7.

Зависимость степени извлечения элемента от температуры обработки пыли ДСП в вакуумной печи сопротивления представлена на рис. 4.

В соответствии с рис. 4, при нагревании электроплавильной пыли в токе аргона с постоянной скоростью наблюдали существенное снижение содержания углерода, цинка и свинца. Удаление свинца и цинка из образца протекало в интервале температур 800 – 1200 °С. При этом степень извлечения свинца выше. Интенсивное удаление свинца протекало при температурах свыше 1000 °С, а интенсивное удаление цинка начиналось при температурах свыше 1100 °С. Для изучения возмож-

Содержание свинца, цинка и углерода в пыли ДСП до и после нагрева в вакуумной печи сопротивления в токе аргона

Table 7. Lead, zinc and carbon content in EAF dust before and after heating in the vacuum resistance furnace with flowing argon

Элемент	Исходный состав	Содержание элементов, % (по массе), при температуре обработки, °С						
		800	1000	1100	1200		1300	
С	1,74	1,29	0,92	0,40	0,06	0,06	н.д.	н.д.
Zn	14,50	14,70	14,80	14,70	9,40	9,70	7,90	8,40
Pb	1,00	1,00	0,70	0,60	0	0	0	0

Примечание: н. д. – нет данных

ности селективного удаления свинца и цинка из пыли ДСП необходимо детальное изучение их поведения в интервале температур 800 – 1200 °С в печи Таммана, позволяющей реализовать проведение аналогичных экспериментов в изотермических условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ПЕЧИ ТАММАНА

Обработку электросталеплавильной пыли из рукавных фильтров газоочистки ДСП проводили в печи Таммана с графитовым нагревателем ($D = 80$ мм, $L = 400$ мм) в диапазоне температур 800 – 1200 °С, время выдержки 3, 6, 9, 12 мин. Характеристики печи: $P = 40$ кВт; $f = 50$ Гц. Расход аргона марки «ВЧ» – 1 л/мин. Печь оснащена системой водоохлаждения.

Навеску пыли ДСП массой 3 г укладывали в тонкостенный алундовый тигель ($D = 19$ мм, $d = 18$ мм, $H = 40$ мм, $h = 38,5$ мм). Высота слоя составляла 1,25 – 1,50 см.

После достижения в камере печи заданной температуры (800, 900, 1000, 1100, 1200 °С) осуществляли одновременную установку в печь четырех образцов, связанных в кассету. Момент установки образцов

в печь считали временем начала эксперимента. При каждой температуре образцы выдерживали в течение 3, 6, 9, 12 мин.

С повышением температуры печи и времени выдержки наблюдается переход цвета образцов от коричневого через темно-коричневый и темно-серый к черному, что, вероятнее всего, связано с частичным восстановлением магнетита. Образцы, выдержанные при 800, 900, 1000 и 1100 °С (не более трех минут) при извлечении из тигля сохраняли форму, но рассыпались при легком надавливании. Образцы, выдержанные при 1100 °С свыше трех минут, при извлечении из тигля держали форму при надавливании, но достаточно легко измельчались в ступке. Образцы, выдержанные при 1200 °С, измельчались в ступке со значительным усилием. К тому же извлечение из тигля образцов, выдержанных при 1200 °С свыше 6 мин, было затруднительным.

После охлаждения образцов на воздухе проводили измерение массы образцов и исследовали их химический состав ранее описанными методами. Фактическая убыль массы навески после нагрева в печи Таммана в токе аргона представлена в табл. 8. Было отмечено,

Таблица 8

Фактическая убыль массы навески пыли ДСП после нагрева и выдержки в печи Таммана в токе аргона

Table 8. Actual EAF dust mass decrease after heating and holding in the Tamman furnace with flowing argon

Температура выдержки образцов в печи, °С	Фактическая убыль массы, % (отн.) при времени выдержки, мин			
	3	6	9	12
800	0,67	1,67	2,67	4,00
900	1,00	2,33	3,33	4,33
1000	1,67	2,67	4,00	5,33
1100	2,33	3,67	5,67	6,67
1200	8,67	10,33	12,33	14,00

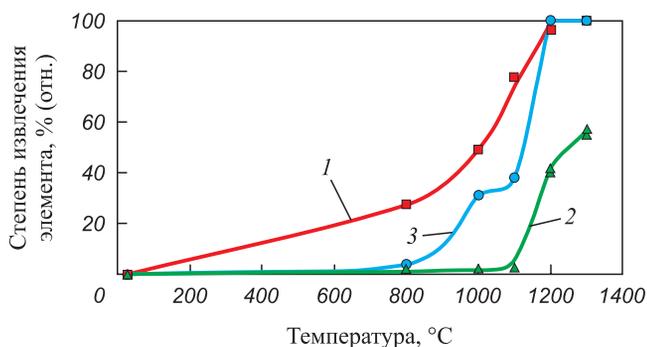


Рис. 4. Зависимость степени извлечения элемента от температуры обработки пыли ДСП в вакуумной печи сопротивления: 1 – С; 2 – Zn; 3 – Pb

Fig. 4. Dependence of the element extraction rate on the temperature of EAF dust treatment in vacuum resistance furnace: 1 – C; 2 – Zn; 3 – Pb

что потеря массы при температуре 1200 °С существенно выше.

Содержание свинца, цинка (определяли на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектроанализаторе МАКС-GVM) и углерода (определяли на приборе Leco CS 600 методом высокотемпературной экстракции в несущем газе) в пыли ДСП после нагрева в печи Таммана в токе аргона представлено в табл. 9.

Зависимости степени извлечения углерода, цинка и свинца из пыли ДСП от времени выдержки при нагреве в печи Таммана (800 – 1200 °С) в токе аргона представлены на рис. 5 – 7.

В соответствии с рис. 5 – 7, при изотермическом нагревании электросталеплавильной пыли в инертной атмосфере наблюдали изменение концентраций свинца, цинка и углерода.

Достижение полного перехода свинца в газовую фазу в ходе экспериментов достигалось при темпера-

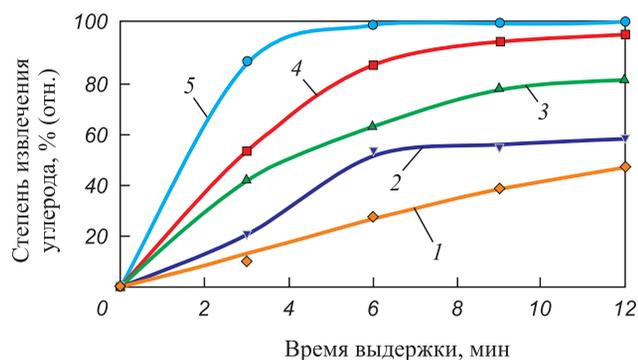


Рис. 5. Зависимость степени извлечения углерода из пыли ДСП от времени выдержки при нагреве в печи Таммана в токе аргона, °С: 1 – 800; 2 – 900; 3 – 1000; 4 – 1100; 5 – 1200

Fig. 5. Dependence of the extraction rate of carbon from EAF dust on the holding time during heating in the Tamman furnace with flowing argon at, °C: 1 – 800; 2 – 900; 3 – 1000; 4 – 1100; 5 – 1200

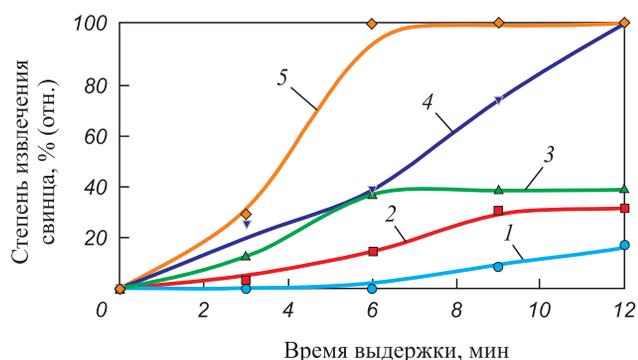


Рис. 6. Зависимость степени извлечения свинца из пыли ДСП от времени выдержки при нагреве в печи Таммана в токе аргона, °С: 1 – 800; 2 – 900; 3 – 1000; 4 – 1100; 5 – 1200

Fig. 6. Dependence of the extraction rate of lead from EAF dust on the holding time during heating in the Tamman furnace with flowing argon at, °C: 1 – 800; 2 – 900; 3 – 1000; 4 – 1100; 5 – 1200

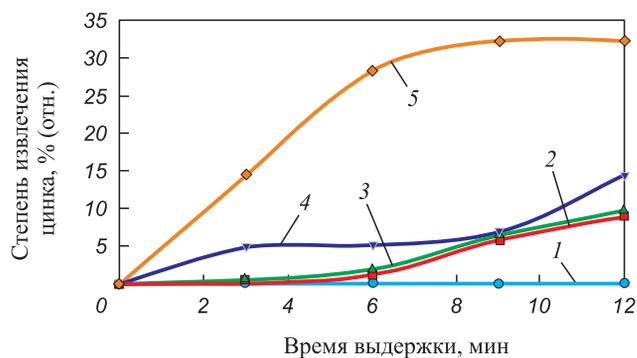


Рис. 7. Зависимость степени извлечения цинка из пыли ДСП от времени выдержки при нагреве в печи Таммана в токе аргона, °С: 1 – 800; 2 – 900; 3 – 1000; 4 – 1100; 5 – 1200

Fig. 7. Dependence of the extraction rate of zinc from EAF dust on the holding time during heating in the Tamman furnace with flowing argon at, °C: 1 – 800; 2 – 900; 3 – 1000; 4 – 1100; 5 – 1200

туре 1100 °С (время выдержки 12 мин) и при температуре 1200 °С (время выдержки 6 мин и более). В то же время при температурах 900 и 1000 °С увеличение времени выдержки образцов с 9 до 12 мин не приводило к повышению степени извлечения свинца при наличии в образцах углерода. Поэтому можно предположить совокупное протекание нескольких реакций восстановления Pb_2O_3 , протекающих в интервале температур 800 – 1200 °С.

Параллельно с переходом свинца в газовую фазу наблюдали извлечение цинка в количестве 14,4 % (отн.) ($t = 1100$ °С, время выдержки 12 мин) и 32,2 % (отн.) ($t = 1200$ °С, время выдержки 6 мин и более) соответственно, что свидетельствует о не достижении селективного извлечения свинца при нагреве пыли ДСП в условиях эксперимента. Последующий нагрев пыли ДСП, вероятно, приведет к селективному извлечению цинка, что связано с полным удалением свинца из пыли ДСП в ходе эксперимента. Поскольку эксперименты выполнены с шагом 100 °С, есть вероятность достижения более высокой селективности извлечения цинка и свинца при уточнении температур процессов для конкретных составов пыли. Поскольку при температуре 1200 °С наблюдали выход степени извлечения цинка на плато при параллельном снижении содержания углерода в пыли ДСП до нулевых значений, можно предположить прекращение протекания реакций восстановления цинксодержащих фаз в связи с нехваткой восстановителя.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами термодинамического моделирования по программе HSC Chemistry 6 подтвердило, что переход свинецсодержащих фаз пыли ДСП в газовое состояние может протекать по реакциям 1 – 6 (табл. 1). При этом переход цинксодержащих фаз пыли ДСП в газовое состояние вероятнее всего происходит за счет реакций 7 – 8 (табл. 2) и 12 – 14 (табл. 3).

Изменение содержания свинца, цинка и углерода в пыли ДСП после нагрева и выдержки в печи Таммана в токе аргона

Table 9. Lead, zinc and carbon content change in EAF dust after heating and holding in the Tamman furnace with flowing argon

Элемент	Температура обработки, °С	Исходный состав, % (по массе)	Химический состав пыли, % (по массе) при времени выдержки, мин			
			3	6	9	12
C	800	1,74	1,59	1,31	1,13	1,00
Zn		14,50	14,60	14,70	14,90	15,00
Pb		1,00	1,00	1,00	0,90	0,90
C	900	1,74	1,41	0,87	0,86	0,81
Zn		14,50	14,60	14,70	14,20	13,80
Pb		1,00	1,00	0,90	0,70	0,70
C	1000	1,74	1,06	0,71	0,47	0,41
Zn		14,50	14,70	14,60	14,10	13,80
Pb		1,00	0,90	0,60	0,60	0,60
C	1100	1,74	0,88	0,30	0,15	0,10
Zn		14,50	14,10	14,30	14,30	13,30
Pb		1,00	0,70	0,60	0,30	0
C	1200	1,74	0,29	0,04	0,02	0,01
Zn		14,50	13,60	11,60	11,20	11,40
Pb		1,00	0,80	0	0	0

Углерода, содержащегося в пыли ДСП, не хватило на восстановление цинка из его соединений, что связано с восстановлением марганца и железа из шпинели сложного состава (Zn, Mn, Fe)₃O₄. Для завершения процесса восстановления цинксодержащих фаз в рассматриваемом образце пыли необходимо внесение восстановителя в виде углерода или СО. Поскольку требуется внесение дополнительного восстановителя после восстановления свинецсодержащей фазы, более удачным вариантом видится интенсификация процесса восстановления цинка из электросталеплавильной пыли в газовую фазу продувкой СО. Увеличение расхода восстановителя позволяет снизить температуру восстановления цинка [21]. Например, повышение концентрации СО от 75 до 85 % при 1200 °С приводит к повышению интенсивности удаления цинка в газовую фазу в 4 – 5 раз [13].

Авторами работы [22] описано исследование извлечения цинка и железа из электросталеплавильной пыли в рамках пирометаллургического процесса с использованием в качестве восстановителя монооксида углерода при различных температурах. Оптимальная рабочая температура составляла 950 °С. При этом отмечено отрицательное влияние присутствия других примесей, таких как хлориды щелочных металлов (NaCl, KCl) и соединений свинца. Уменьшение их влияния может быть достигнуто при организации селективного извлечения свинца и цинка из пыли ДСП.

Выводы

Выполнено термодинамическое моделирование процесса селективного извлечения цинка и свинца из пыли ДСП. Определено, что селективное извлечение свинца и цинка из электросталеплавильной пыли может быть реализовано двумя способами (температуры приведены без учета добавления в систему инертного газа):

- последовательное восстановление углеродом или монооксидом углерода свинец- (295 – 877 °С) и цинксодержащих фаз (794 – 1326 °С);

- восстановление углеродом или монооксидом углерода свинецсодержащих фаз (295 – 877 °С) и термическая диссоциация цинксодержащих фаз (1970 °С).

Эксперименты в вакуумной печи сопротивления при линейном нагреве показали, что извлечение свинца и цинка из образца протекает в интервале температур 800 – 1200 °С. При этом степень извлечения свинца выше. Интенсивное удаление свинца протекает при температурах свыше 1000 °С, а интенсивное удаление цинка при температурах свыше 1200 °С.

Уточняющие изотермические эксперименты, выполненные в печи Таммана, показали, что достижение полного перехода свинецсодержащей фазы в газовую фазу достигалось при температуре 1100 °С (время выдержки 12 мин) и при температуре 1200 °С (время выдержки 6 мин и более). Параллельно с переходом свинца в газо-

вую фазу наблюдали извлечение цинка в количестве 14,4 и 32,2 % (отн.) соответственно, что свидетельствует о не достижении селективного извлечения свинца при нагреве пыли ДСП в условиях эксперимента. Последующий нагрев пыли ДСП, вероятно, приведет к селективному извлечению цинка, что связано с полным удалением свинца из пыли ДСП в ходе эксперимента.

При сопоставлении экспериментальных данных и данных термодинамического моделирования определены реакции, протекание которых наиболее вероятно при восстановлении свинец- и цинксодержащих фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Патрушов А.Е. Оценка технико-экономической эффективности пирометаллургической технологии переработки пылей электросталеплавильного производства. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020;24(3):672–683. <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-672-683>
2. Патрушов А.Е. Technical and economic efficiency evaluation of pyrometallurgical technology for processing dust from electric steel production. *iPolytech Journal*. 2020;24(3):672–683. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-672-683>
3. Тюшняков С.Н., Селиванов Е.Н., Панкратов А.А. Формы нахождения цинка в пыли газоочистки электросталеплавильных печей. *Металлург*. 2018;(6):8–13.
4. Tyushnyakov S.N., Selivanov E.N., Pankratov A.A. Forms of zinc found in electric steel smelting furnace gas cleaning dust. *Metallurgist*. 2018;62(5-6):485–492. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0685-z>
5. Da Silva Machado J.G.M., Brehm F.A., Moraes C.A.M., dos Santos C.A., Vilela A.C.F. Characterization study of electric arc furnace dust phases. *Materials Research*. 2006;9(1):30–36. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>
6. Ahmad S., Sajal W.R., Gulshan F., Hasan M., Rhamdhani M.A. Thermodynamic analysis of caustic-roasting of electric arc furnace dust. *Heliyon*. 2022;8(10):e11031. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11031>
7. Omran M., Fabritius T. Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts. *Powder Technology*. 2017;308:47–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.049>
8. Halli P., Agarwal V., Partinen J., Lundström M. Recovery of Pb and Zn from a citrate leach liquor of a roasted EAF dust using precipitation and solvent extraction. *Separation and Purification Technology*. 2020;236:116264. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116264>
9. Leclerc N., Meux E., Lecuire J.-M. Hydrometallurgical recovery of zinc and lead from electric arc furnace dust using mononitriлотриacetate anion and hexahydrated ferric chloride. *Journal of Hazardous Materials*. 2001;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)
10. Antuñano N., Cambra J.F., Arias P.L. Hydrometallurgical processes for Waelz oxide valorisation – An overview. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019;129:308–320. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.028>
9. Al-Harashsheh M., Altarawneh S., Al-Omari M. Selective dissolution of zinc and lead from electric arc furnace dust via oxidative thermolysis with polyvinyl chloride and water-leaching process. *Hydrometallurgy*. 2022;212:105898. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105898>
10. Разинкова О.А. Источники загрязнения окружающей среды в гидromеталлургическом производстве и пути их использования. *Научный потенциал регионов на службу модернизации*. 2013;(1):25–29.
11. Razinkova O.A. Sources of environmental pollution in hydrometallurgical production and ways of their use. *Nauchnyi potentsial regionov na sluzhbu modernizatsii*. 2013;(1):25–29. (In Russ.).
11. Wang L., Peng Z., Lin X., Ye Q., Ye L., Zhang J., Liu Y., Liu M., Rao M., Li G., Jiang T. Microwave-intensified treatment of low-zinc EAF dust: A route toward high-grade metallized product with a focus on multiple elements. *Powder Technology*. 2021;383:509–521. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.047>
12. Adedoyin F.F., Gumede M.I., Bekum F.V., Etokakpan M.U., Balsalobre-Lorente D. Modelling coal rent, economic growth and CO₂ emissions: Does regulatory quality matter in BRICS economies? *Science of the Total Environment*. 2020;710:136284. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136284>
13. Марченко Н.В., Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М. *Металлургия тяжелых цветных металлов: Электронное учебное пособие* [Электронный ресурс]. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. URL: <https://c-metal.ru/image/catalog/books/Marchenko.pdf> (дата обращения 11.05.2023).
14. Marchenko N.V., Vershinina E.P., Gil'debrandt E.M. *Metalurgy of Heavy Non-Ferrous Metals*. Available at URL: <https://c-metal.ru/image/catalog/books/Marchenko.pdf> (Accessed 11.05.2023). (In Russ.).
14. 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>
15. 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>
15. Грудинский П.И., Дюбанов В.Г., Козлов П.А. Исследование процессов дистилляционного разделения пыли плавки меди с первичным извлечением свинца. *Металлы*. 2018;(1):9–16.
16. Grudinsky P.I., Dyubanov V.G., Kozlov P.A. Distillation separation of the copper-smelting dusts with primary recovery of lead. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018;2018(1):7–13. <https://doi.org/10.1134/S003602951801007X>
16. Jabbour K., El Hassan N. Optimized conditions for reduction of iron (III) oxide into metallic form under hydrogen atmosphere: A thermodynamic approach. *Chemical Engineering Science*. 2022;252:117297. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117297>
17. Клеоновский М.В., Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Лозовая Е.Ю. Термодинамическое моделирование восстановления цинка из шламов черной металлургии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(3):170–178. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-170-178>

- Kleonovskii M.V., Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Lozovaya E.Yu. Thermodynamic modeling of zinc recovery from ferrous metallurgy sludge. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(3):170–178. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-170-178>
18. Omran M., Fabritius T. Utilization of blast furnace sludge for the removal of zinc from steelmaking dusts using microwave heating. *Separation and Purification Technology*. 2019;210:867–884.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.010>
19. Li C., Liu W., Jiao F., Yang C., Li G., Liu S., Qin W. Separation and recovery of zinc, lead and iron from electric arc furnace dust by low temperature smelting. *Separation and Purification Technology*. 2023;312:123355.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123355>
20. Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий. Тезисы докладов XIV Международной конференции по химической термодинамике. СПб: НИИ Химии СПбГУ; 2002:483.
- Trusov B.G. TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria. In: *Abstracts of the XIV Int. Conf. on Chemical Thermodynamics*. St. Petersburg: NII Khimii SpbSU; 2002:483. (In Russ.).
21. Вусихис А.С., Селиванов Е.Н., Леонтьев Л.И., Тюшняков С.Н. Термодинамическое моделирование процессов восстановления металлов из расплавов B_2O_3 -CaO-FeO-ZnO. *Металлы*. 2022;(3):17–23.
- Vusikhis A.S., Selivanov E.N., Leont'ev L.I., Tyushnyakov S.N. Thermodynamic simulation of metal reduction from B_2O_3 -CaO-FeO-ZnO melts by hydrogen and carbon monoxide. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022;2022(5):475–480. <https://doi.org/10.1134/S0036029522050111>
22. Wu C.-C., Chang F.-C., Chen W.-S., Tsay M.-S., Wang Y.-N. Reduction behavior of zinc ferrite in EAF-dust recycling with CO gas as a reducing agent. *Journal of Environmental Management*. 2014;143:208–213.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.005>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Надежда Владимировна Подусовская, младший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-4124-0444

E-mail: ndemidova_n@mail.ru

Ольга Александровна Комолова, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; доцент кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0001-9517-8263

E-mail: o.a.komolova@gmail.com

Константин Всеволодович Григорович, академик РАН, д.т.н., заведующий лабораторией диагностики материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-5669-4262

E-mail: grigorov@imet.ac.ru

Александр Васильевич Павлов, д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0003-3773-9469

E-mail: pav-gnts@misis.ru

Виктория Владимировна Аксенова, аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: axenovaviki@gmail.com

Борис Алексеевич Румянцев, к.т.н., научный сотрудник лаборатории диагностики материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

ORCID: 0000-0001-8250-3565

E-mail: brumyantsev@imet.ac.ru

Nadezhda V. Podusovskaya, Junior Researcher of the Laboratory of Materials Diagnostics, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology "MISIS"

ORCID: 0000-0002-4124-0444

E-mail: ndemidova_n@mail.ru

Ol'ga A. Komolova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Materials Diagnostics, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology "MISIS"

ORCID: 0000-0001-9517-8263

E-mail: o.a.komolova@gmail.com

Konstantin V. Grigorovich, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Materials Diagnostics, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Prof. of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology "MISIS"

ORCID: 0000-0002-5669-4262

E-mail: grigorov@imet.ac.ru

Aleksandr V. Pavlov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology "MISIS"

ORCID: 0000-0003-3773-9469

E-mail: pav-gnts@misis.ru

Viktoriya V. Aksenova, Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology "MISIS"

E-mail: axenovaviki@gmail.com

Boris A. Rumyantsev, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Materials Diagnostics, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-8250-3565

E-mail: brumyantsev@imet.ac.ru

Марк Владимирович Железный, младший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; ассистент кафедры физического материаловедения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0003-3821-6790

E-mail: markiron@mail.ru

Mark V. Zheleznyi, Junior Researcher of the Laboratory of Materials Diagnostics, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Assistant of the Chair of Physical Materials, National University of Science and Technology "MISIS"

ORCID: 0000-0003-3821-6790

E-mail: markiron@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Н. В. Подусовская – проведение термодинамических расчетов, планирование и проведение экспериментов, обработка полученных экспериментальных данных, подготовка текста статьи.

О. А. Комолова – определение цели работы, планирование экспериментов, обсуждение результатов и выводов.

К. В. Григорович – определение цели работы и общей концепции статьи, обсуждение результатов и выводов.

А. В. Павлов – планирование и организация экспериментов.

В. В. Аксенова – определение химического состава образцов методом волно-дисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии (МАКС-GVM).

Б. А. Румянцев – определение содержания в образцах серы и углерода методом высокотемпературной экстракции в несущем газе (Leco CS 600).

М. В. Железный – проведение рентгенодифракционного анализа (XRD) исходного состава пыли.

N. V. Podusovskaya – conducting thermodynamic calculations, planning and conducting experiments, processing of the obtained experimental data, writing the text.

O. A. Komolova – setting the research goal, experiments planning, discussion of the results and conclusions.

K. V. Grigorovich – setting the research goal, formation of the article main concept, discussion of the results and conclusions.

A. V. Pavlov – planning and organization of experiments.

V. V. Aksenova – samples chemical composition determination by wave-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (MAX-GVM).

B. A. Rumyantsev – determination of S and C content by high-temperature extraction in a carrier gas (Leco CS 600).

M. V. Zheleznyi – X-ray diffraction analysis (XRD) of initial dust composition.

Поступила в редакцию 03.05.2023

После доработки 05.05.2023

Принята к публикации 05.05.2023

Received 03.05.2023

Revised 05.05.2023

Accepted 05.05.2023