

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 542.494:546.723'722-31+546.47

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-203-210>

Поступила в редакцию 23.02.2022

Received 23.02.2022

И. В. Мацукевич, Н. В. Кулинич, В. В. Тавгень*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***РАЗДЕЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗО- И ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ ПЫЛИ
ГАЗООЧИСТОК ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Аннотация. В настоящее время объемы использования пыли газоочистных установок электросталеплавильных печей (ПГУ) крайне незначительны, при хранении они оказывают воздействие на окружающую среду, в то же время представляют собой материал, имеющий ценный состав (оксиды железа, цветные металлы и др.), перспективный для вторичного использования. Однако вторичное использование цинксоодержащей ПГУ в черной металлургии приводит к накоплению цинка в футеровках доменных печей и частым неисправностям. Установлено, что оксид цинка находится в основном в связанном состоянии в составе фазы франклинита $(Zn, Mn, Fe)(Fe, Mn)_2O_4$. Исследованы процессы твердофазного восстановления пыли газоочистных установок электросталеплавильных печей с получением цинкового концентрата и губчатого железа, которые являются востребованным сырьем для цветной и черной металлургии. Определены оптимальные условия процесса восстановления, исследованы физико-химические характеристики, гранулометрический и фазовый состав исходных материалов и продуктов восстановления. Установлено, что применение комбинации восстановителей различной природы (угольный кокс и H_2) в процессе термообработки при 1100 °С и охлаждения в восстановительной среде (Ar/H_2) позволяет получить губчатое железо с высокой степенью металлизации – 97,5 %.

Ключевые слова: пыль газоочисток электросталеплавильных производств, оксид железа, оксид цинка, микроструктура, гранулометрический и фазовый составы

Для цитирования. Мацукевич, И. В. Разделение железо- и цинксоодержащих компонентов пыли газоочисток электросталеплавильных производств / И. В. Мацукевич, Н. В. Кулинич, В. В. Тавгень // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 203–210. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-203-210>

I. V. Matsukevich, N. V. Kulinich, V. V. Tauhen*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***SEPARATION OF IRON AND ZINC COMPONENTS DUST
OF GAS CLEANING DEVICES OF THE ELECTRIC STEELMAKING PRODUCTIONS**

Abstract. Currently, the volumes of use of dust from gas-cleaning devices (DGD) of electric steel furnaces are extremely insignificant, as they have an impact on the environment during storage, but at the same time, they represent the material that has a valuable composition (oxides of iron, non-ferrous metals, etc.) and is promising for recycling. However, the secondary use of zinc-containing DGD in ferrous metallurgy leads to the accumulation of zinc in the lining of blast furnaces and frequent malfunctions. It has been established that zinc oxide remains mainly in the bound state in the frankinite phase $(Zn, Mn, Fe)(Fe, Mn)_2O_4$. The processes of solid-phase reduction of dust from gas-cleaning devices of electric steel furnaces with the production of zinc concentrate and sponge iron, that are raw materials in demand for non-ferrous and ferrous metallurgy, are studied. The optimal conditions for the reduction process were determined, the physicochemical characteristics, granulometric and phase composition of the starting materials and reduction products were studied. It has been established, that the use of a combination of reducing agents of different nature (coal coke and H_2) during heat treatment at 1100 °C and cooling in a reducing medium (Ar/H_2) makes it possible to obtain sponge iron with a high degree of metallization – 97,5 %.

Keywords: gas cleaning dust of electric steelmaking plants, iron oxide, zinc oxide, microstructure, granulometric composition, phase composition

For citation. Matsukevich I. V., Kulinich N. V., Tauhen V. V. Separation of iron and zinc components dust of gas cleaning devices of the electric steelmaking productions. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 203–210 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-203-210>

Введение. Пыль газоочисток электросталеплавильных производств представляет собой мелкодисперсную фракцию, содержащую преимущественно железо и цинк в виде оксидов, феррита цинка и других соединений. В настоящее время объемы использования данных отходов крайне незначительны, а при хранении они оказывают воздействие на окружающую среду,

при этом они представляют собой перспективный материал для вторичного использования благодаря высокому содержанию в них железа и цинка [1–3]. Однако именно высокое содержание цинка в составе пыли затрудняет ее дальнейшее использование. Вторичное использование цинксодержащих материалов в доменном переделе приводит к накоплению цинка в футеровках доменной печи и ее разрушению [3]. Поэтому одной из основных стадий их переработки является обесцинкование, которое можно проводить пиро- (в основном в черной металлургии), гидрOMETаллургическими (в основном в цветной металлургии), гравитационными и другими методами [4–14]. В случае пирометаллургического метода при обжиге с углеродом при температуре 950–1050 °С цинк, образующийся в газообразном состоянии, возгоняется. На сегодняшний день предложены различные варианты данной технологии, начиная от предварительной подготовки пыли (получение окатышей с добавлением углерода), до специальных способов нагрева (плазменная обработка) [1, 2, 8]. ГидрOMETаллургический метод с использованием как кислот, так щелочей и солей также не нашел широкого распространения из-за дороговизны применяемого оборудования и образования весьма токсичных отходов, требующих дорогостоящих систем очистки [5]. В то же время следует отметить, что цинк может присутствовать в составе ферритов, силикатов, сульфидов и др., что значительно затрудняет его выделение данным способом.

Наибольшее применение в практике обесцинкования пылей и шламов получили пирометаллургические способы, сочетающие процессы твердофазного восстановления оксидов углеродосодержащими материалами (кокс или уголь) с возгонкой металлического цинка, свинца и других летучих примесей и получением металлизированного железосодержащего губчатого продукта (вельц-процесс в цветной металлургии [13]). Восстановление происходит, как правило, во вращающихся трубчатых печах при температуре 1100–1200 °С. В процессе восстановления наряду с образованием железа металлического удаляется до 99 % цинка и свинца.

Цель данной работы – исследование процессов восстановления ПГУ с получением цинкового концентрата и губчатого железа, определение оптимальных условий процесса, исследование физико-химических характеристик, гранулометрического и фазового состава исходных материалов и продуктов восстановления, установление оптимальных условий эффективной металлизации ПГУ.

Методика эксперимента. В качестве основного образца для исследования применяли образец ПГУ, химический состав которого приведен в табл. 1. Химический состав исходного образца определен с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой iCAP 7000 Thermo Scientific (США), а также с помощью метода элементного рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре S8 TIGER фирмы Bruker AXS GmbH (Германия).

Таблица 1. Химический состав исходного образца ПГУ в пересчете на простые оксиды

Table 1. Chemical composition of the initial DGD sample in terms of simple oxides

Метод определения состава ПГУ	Содержание компонента, мас.%										
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	PbO	ZnO	CaO	MgO	NiO	SiO ₂	CuO
Атомно-эмиссионная спектроскопия	38,3	0,9	0,44	1,55	1,4	24,15	6,6	1,3	0,025	5,7	0,15
Рентгено-флуоресцентная спектроскопия	35,7	0,74	0,37	1,95	1,28	25,1	9,55	0,98	0,027	4,78	0,21

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили с помощью дифрактометра Дрон-3 (Cu-K_α – излучение). Идентификацию кристаллических фаз осуществляли с помощью программного обеспечения Match и базы данной международной картотеки Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS). Микроструктуру, элементный состав образцов и состав отдельных фаз образцов исследовали с помощью методов сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа (EDX-спектроскопия) на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV (Япония). Гранулометрический состав образцов ПГУ определяли с помощью лазерного анализатора размера частиц Analysette 22 compact (Fritsch, Германия).

Для изучения процесса восстановления были изготовлены брикетированные композиции, состоящие из ПГУ и углеродного восстановителя – угольного кокса ГОСТ 8935-2020 (УК). Для таблетирования угольный кокс и порошки ПГУ предварительно измельчали на лабораторной

лопастной мельнице DJ-04 (Китай, Yontai Lingyu Powder Machinery Co.) и просеивали через сито с размером ячеек 100 мкм. При изготовлении брикетов использовали порошки крупностью менее 100 мкм. Образцы № 1, 2, 3 были получены после смешивания ПГУ и уголь кокса при их массовом соотношении 10 : 1; 4 : 1; 2,5 : 1 соответственно. Таблетирование смесей осуществляли в необогреваемых цилиндрических стальных пресс-формах с внутренним диаметром 15 мм на гидравлическом прессе при давлении прессования 50 МПа и времени выдержки 30 с. Процесс восстановления проводили при термической обработке таблеток в токе газовой смеси (Ar/H₂ – 5 об.%) в лабораторной трубчатой электропечи SNOL 0,4/1250 при температуре 1000 и 1100 °С в течение 60 мин. Расход газовой смеси Ar/H₂ составлял около 1,5 см³/с. После выдержки в течение заданного времени восстановления печь отключали, кварцевую трубку выдвигали из печи на расстояние достаточное для того, чтобы лодочка с образцами находилась вне горячей зоны. Одну часть образцов охлаждали на воздухе, другую – в токе газовой смеси Ar/H₂ в течение 30 мин. После охлаждения образцы помещали в эксикатор.

Степень металлизации (φ) рассчитывали по результатам определения содержания общего железа (Fe_{общ}) и металлического (Fe_{мет}), выполненного в соответствии с ГОСТ 32517.1-2013 и ГОСТ 26482-90 по формуле:

$$\varphi = \frac{Fe_{мет}}{Fe_{общ}} 100 \%$$

Результаты и их обсуждение. Результаты атомно-эмиссионной спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа образца ПГУ хорошо согласуются между собой и показывают содержание оксида цинка около 25 мас.% (табл. 1). Следует отметить, что состав исходных образцов ПГУ зависит от исходного сырья, поступающего на переработку в электросталеплавильные печи, при этом содержание цинка может сильно варьироваться и в пересчете на оксид составлять от 10 до 45 мас.%.

Как видно на микрофотографии, исходный образец ПГУ характеризуется неоднородной микроструктурой с различным содержанием цинка и железа в точках 1, 2, 3 (рис. 1, а, табл. 2). В соответствии с результатами анализа гранулометрического состава размеры частиц ПГУ варьируются в широком диапазоне – от 0,12 до 50 мкм.

По результатам РФА в состав пыли ПГУ входят следующие фазы (в пределах погрешности рентгенофазового анализа): франклинит (Zn, Mn, Fe)(Fe, Mn)₂O₄, Fe₃O₄, ZnO и Pb₂O₃ (рис. 1, б), при этом с учетом данных табл. 1 ПГУ содержит оксиды SiO₂, Mn₂O₃, Cr₂O₃, CaO и др. Оксид цинка находится в основном в связанном состоянии в составе фазы (Zn, Mn, Fe)(Fe, Mn)₂O₄ (рис. 1, б), что значительно затрудняет его извлечение.

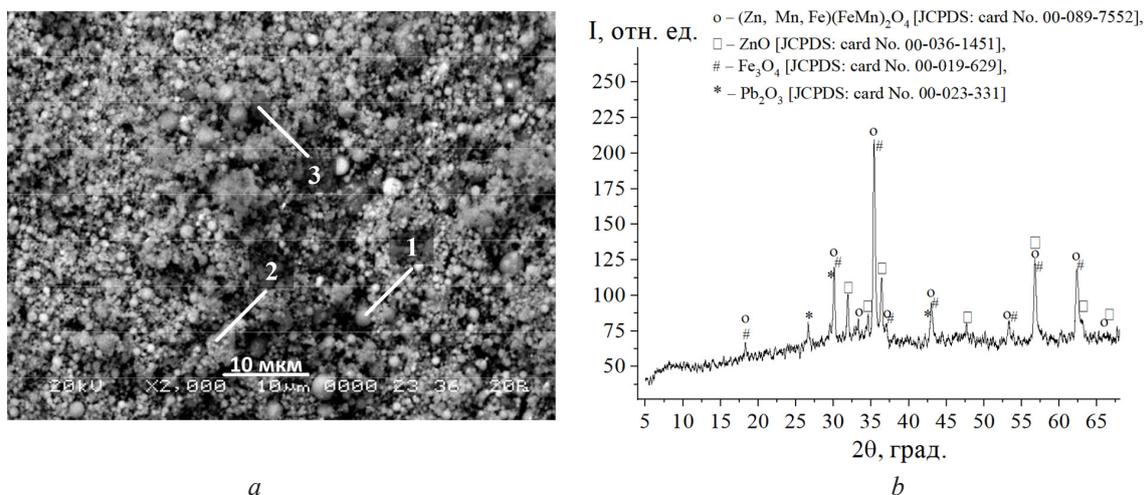


Рис. 1. Электронная микрофотография (а) и рентгеновская дифрактограмма (б) исходного образца пыли газоочистных установок электросталеплавильных печей

Fig. 1. Electron micrograph (a) and X-ray diffraction pattern (b) of the original dust sample from gas-cleaning device of electric steel furnaces

Т а б л и ц а 2. Содержание железа и цинка в исходном образце ПГУ, определенные с помощью EDX-спектроскопии, в точках 1, 2, 3, отмеченных на рис. 1, а

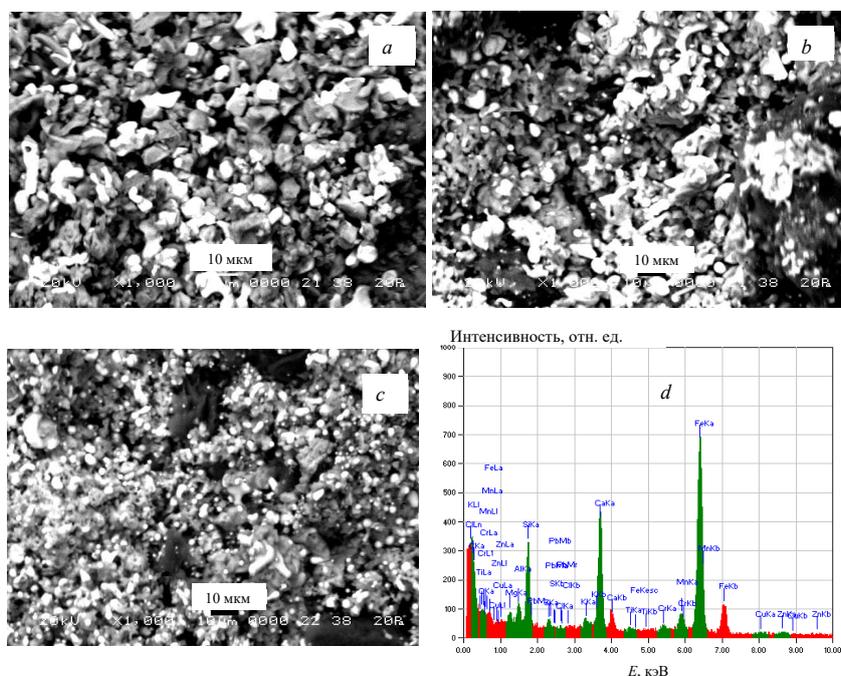
Table 2. The content of iron and zinc in the initial DGB sample, determined using EDX spectroscopy, at points 1, 2, 3, marked in Fig. 1, a

Элемент	Валовое содержание, мас.%	Содержание в точке 1, мас.%	Содержание в точке 2, мас.%	Содержание в точке 3, мас.%
Zn	40,06	22,8	49,0	30,2
Fe	36,47	61,4	21,4	29,5

После процесса восстановления получали образцы порошкообразного оксида цинка и таблетированные пористые образцы губчатого железа со степенью металлизации от 83,5 до 97,5 % (табл. 3). Степень металлизации железосодержащих образцов зависела от условий процесса восстановления и охлаждения образцов (табл. 3), наибольшее значение степени металлизации 97,5 % установлено для образца № 2, полученного при восстановлении в атмосфере Ar/H₂ при температуре 1100 °С, при этом охлаждение образца проводили также в атмосфере Ar/H₂.

Т а б л и ц а 3. Содержание общего (Fe_{общ}) и металлического (Fe_{мет}) железа и степень металлизации (φ) после процесса восстановления образцов ПГУTable 3. Total (Fe_{общ}) and metal (Fe_{мет}) iron content and metallization degree (φ) after the reduction of DGD samples

Номер образца	Массовое соотношение ПГУ/УК	Условия процесса восстановления		Атмосфера охлаждения после процесса	Fe _{общ} , мас.%	Fe _{мет} , мас.%	φ, %
		температура, °С	атмосфера				
1	10 : 1	1000	Ar/H ₂	Воздух	43,8	36,6	83,5
				Ar/H ₂	49,5	44,8	90,5
2	4 : 1	1000	Ar/H ₂	Воздух	50,5	44,0	87,0
				Ar/H ₂	51,8	48,2	93,1
		1100	Ar/H ₂	56,6	54,9	97,5	
3	2,5 : 1	1000	Ar/H ₂	Воздух	54,8	49,6	90,5
				Ar/H ₂	59,5	56,8	95,5
		1100	Ar/H ₂	60,3	57,6	95,5	

Рис. 2. Электронные микрофотографии образцов № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (с) после процесса восстановления (при температуре 1100 °С) и охлаждения в атмосфере Ar/H₂ и результаты EDX-спектроскопии образца № 3 (д)Fig. 2. Electron micrographs of samples no. 1 (a), no. 2 (b), and no. 3 (c) after the reduction process (at a temperature of 1100 °С) and cooling in an Ar/H₂ atmosphere and the results of EDX spectroscopy of sample no. 3 (d)

С увеличением содержания угольного кокса в образцах после процесса металлизации размеры кристаллитов заметно уменьшались (рис. 2), что, очевидно, связано с повышением объема образования газообразных продуктов реакций (CO_2 и CO).

Значения степени металлизации ϕ (табл. 3) согласуются с результатами РФА, представленными на рис. 3, из которого видно, что значительное влияние на фазовый состав конечного продукта оказывает атмосфера охлаждения – высокое содержание металлического железа $\text{Fe}_{\text{мет}}$ достигается при охлаждении в атмосфере Ar/H_2 .

Для образцов № 2 и 3 после процесса восстановления (при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$) и охлаждения в атмосфере Ar/H_2 содержание цинка по результатам EDX-спектроскопии составило соответственно 0,14 и 0,18 мас.%, а по результатам рентгенофлуоресцентной спектроскопии – 0,16 и 0,29 мас.% (табл. 4), что удовлетворяет условию использования такого материала в доменном процессе – содержание цинка не должно превышать 0,3–0,5 мас.% [19]. После процесса восстановления в образцах № 2 и 3 свинец в пределах погрешности элементного рентгенофлуоресцентного анализа не обнаружен (табл. 4), что, вероятно, связано с его возгонкой и выносом из высокотемпературной реакционной зоны.

После завершения процесса восстановления при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$ был получен оксид цинка с содержанием основного вещества около 98,4 мас.% и примесью оксида меди, содержание которого составило 1,6 мас.% (в соответствии с результатами EDX-спектроскопии), при этом, как видно из рис. 4, ZnO характеризуется достаточно однородной микроструктурой. Рентгеновская дифрактограмма (рис. 4, в) оксида цинка, полученного после процесса восстановления (при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$) и охлаждения в атмосфере Ar/H_2 , показывает, что все рефлексы соответствуют ZnO .

Таблица 4. Элементный состав образцов № 2 и 3 ПГУ после процесса восстановления (при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$) и охлаждения в атмосфере Ar/H_2

Table 4. Elemental composition of DGD samples No. 2 and 3 after the reduction process (at a temperature of $1100\text{ }^\circ\text{C}$) and cooling in an Ar/H_2 atmosphere

Элемент	Содержание, мас.%	
	№ 2	№ 3
Fe	20,8	18,4
Ca	15,0	13,5
Si	5,7	5,21
Mn	2,8	2,55
S	2,1	1,78
Al	1,6	1,51
Mg	1,3	1,1
K	1,3	1,86
Cr	0,64	0,61
Na	0,42	0,47

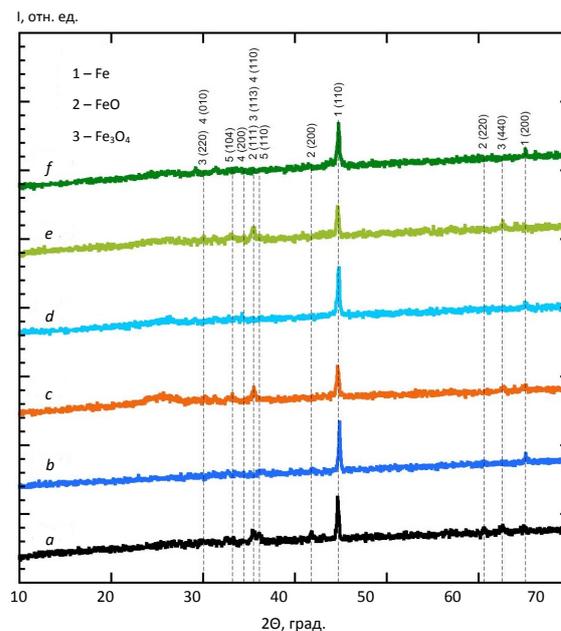


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы образцов № 1 (a, b), № 2 (c, d) и № 3 (e, f) после процесса восстановления в атмосфере Ar/H_2 при температуре $1000\text{ }^\circ\text{C}$, последующего охлаждения на воздухе (a, c, e) и в атмосфере Ar/H_2 (b, d, f)

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of samples No. 1 (a, b), No. 2 (c, d), and No. 3 (e, f) after the reduction process in an Ar/H_2 atmosphere at a temperature of $1100\text{ }^\circ\text{C}$, followed by cooling in air (a, c, e) and in an Ar/H_2 atmosphere (b, d, f)

Окончание табл. 4

Элемент	Содержание, мас.%	
	№ 2	№ 3
Ba	0,19	0,20
Cu	0,18	0,19
Ti	0,17	0,18
Zn	0,16	0,29
P	0,11	0,11
Ni	0,03	0,03

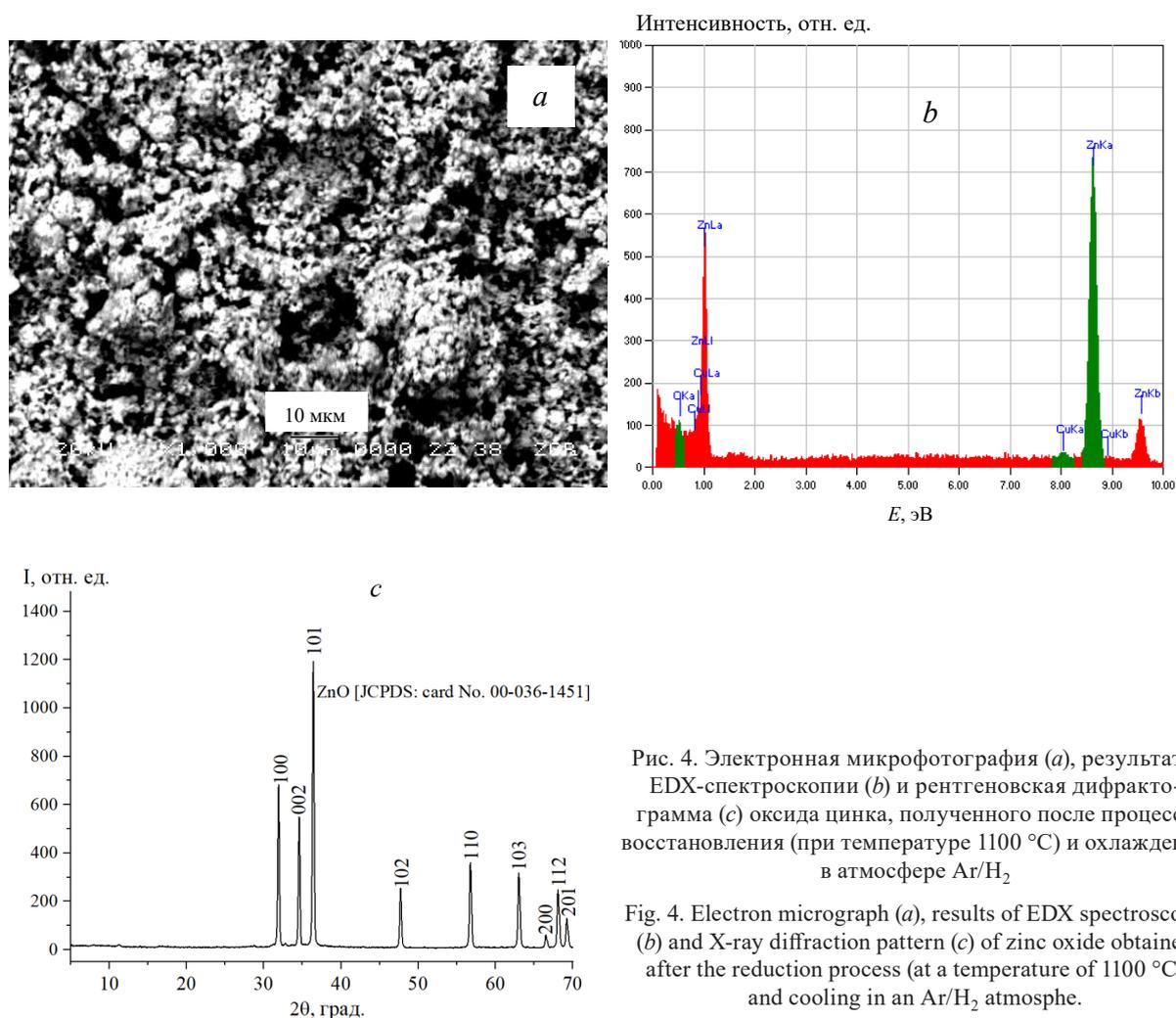


Рис. 4. Электронная микрофотография (а), результаты EDX-спектроскопии (b) и рентгеновская дифрактограмма (с) оксида цинка, полученного после процесса восстановления (при температуре 1100 °С) и охлаждения в атмосфере Ar/H₂

Fig. 4. Electron micrograph (a), results of EDX spectroscopy (b) and X-ray diffraction pattern (c) of zinc oxide obtained after the reduction process (at a temperature of 1100 °C) and cooling in an Ar/H₂ atmosphere.

Заключение. Таким образом, в настоящей работе изучен химический, фазовый состав и микроструктура пыли газоочистных установок электросталеплавильных печей. Установлено, что ПГУ представляет собой неоднородную сложноконпонентную систему с размерами частиц от 0,12 до 50,0 мкм и с непостоянным составом, при этом оксид цинк находится в основном в связанном состоянии в составе фазы франклинита $(\text{Zn}, \text{Mn}, \text{Fe})(\text{Fe}, \text{Mn})_2\text{O}_4$. Определены оптимальные условия процесса восстановления ПГУ, что позволило разработать лабораторный метод одноэтапной высокотемпературной обработки в восстановительной среде с получением таких продуктов, как губчатое железо с высокой степенью металлизации (до 97,5 %) и оксид цинка с содержанием основного вещества около 98,4 мас.%.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам Института общей и неорганической химии НАН Беларуси Л. В. Кульбицкой за запись рентгеновских дифрактограмм, Н. Л. Будейко за проведение рентгенофлуоресцентной спектроскопии, а также А. В. Поспелову (Белорусский государственный технологический университет) за изучение образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» (задания 2.1.3 «Коллоидно-химические основы технологий углубленной переработки минерального и техногенного сырья»).

Acknowledgements. The authors are grateful to the following staff members of the Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus: L. V. Kulbitskaya for recording X-ray diffraction patterns, N. L. Budeiko for X-ray fluorescence spectroscopy, and to A. V. Pospelov (Belarusian State Technological University) for studying samples using scanning electron microscopy of energy dispersive X-ray microanalysis.

The work was supported by the State Scientific Research Program “Chemical Processes, Reagents and Technologies, Bioregulators and Bioorganic Chemistry” (tasks 2.1.3 “Colloid-chemical foundations of technologies for advanced processing of mineral and technogenic raw materials”).

Список использованных источников

1. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust / X. Lin [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – N 149. – P. 1079–1100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>
2. Pyrometallurgical recovery of zinc and valuable metals from electric arc furnace dust – A review / J. Wang [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – N 298. – P. 126788–1–126788–23. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126788>
3. Попов, А. А. К вопросу проблемы утилизации и цинксодеждающей пыли сталеплавильных производств [Электронный ресурс] // *Науковедение*. – 2015. – Т. 7, № 2. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/124TVN215.pdf>. – Дата доступа 26.08.2021.
4. Доронин, И. Е. Промышленные способы переработки сталеплавильной пыли / И. Е. Доронин, А. Г. Свяжин // *Металлург*. – 2010. – № 10. – С. 48–53.
5. Пыль и шлак газоочисток металлургических заводов и анализ путей их утилизации / В. Н. Летимин [и др.] // *Теория и технология металлургического производства*. – 2015. – Т. 16, № 1. – С. 82–86.
6. Коваленко, А. М. О шламах газоочистки доменного и сталеплавильного производств / А. М. Коваленко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – Т. 2, № 12(56). – С. 4–8.
7. Поиск способов утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на белорусском металлургическом заводе / А. В. Демин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 3. – С. 74–79.
8. Wang, L. Microwave-intensified treatment of low-zinc EAF dust: A route toward high-grade metallized product with a focus on multiple elements / L. Wang, Z. Peng // *Powder Technology*. – 2021. – N 383. – P. 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.047>
9. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency / Th. Suetens [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – N 65. – P. 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.053>
10. Comprehensive recycling of zinc and iron from smelting waste containing zinc ferrite by oriented transformation with SO₂ / Y.-Ch. Li [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – N 263. – P. 121468–1–121468–8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121468>
11. Lanzerstorfer, C. Electric arc furnace (EAF) dust: Application of air classification for improved zinc enrichment in in-plant recycling / C. Lanzerstorfer // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – N 174. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.312>
12. Naiyang, M. Recycling of basic oxygen furnace steelmaking dust by in-process separation of zinc from the dust / M. Naiyang // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – N 112. – P. 4497–4504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.009>
13. Microstructural, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process / L. J. H. Buitrago [et al.] // *Matéria (Rio de Janeiro)*. – 2018. – Vol. 22, N 2. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0343>
14. Pickle, C. A. Thermodynamic investigation of the sulphation roasting of electric arc furnace dust / C. A. Pickle, O. Marzoughi // *Minerals*. – 2019. – N 9(1). – P. 18–32. <https://doi.org/10.1016/10.3390/min9010018>
15. Characterization study of electric arc furnace dust phases/ J. G. M. S. Machado [et al.] // *Materials Research*. – 2006. – Vol. 9, N 1. – P. 41–45. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>
16. Получение железоксидного пигмента из пыли металлургического производства для использования в строительстве / Е. Н. Федосеева [и др.] // *Металлург*. – 2015. – № 5. – С. 31–35.
17. Комплексное исследование физико-химических свойств пыли металлургического производства в целях определения основных направлений ее переработки / Е. О. Богдан [и др.] // *Стекло и керамика*. – 2020. – № 5. – С. 26–34.
18. Исследование процессов переработки пыли газоочистки сталеплавильных производств / С. Л. Римовский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 1. – С. 106–113. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-106-113>
19. Летимин, В. Н. Оценка пирометаллургических способов обесцинковывания пыли и шламов сталеплавильных цехов / В. Н. Летимин, Т. М. Насыров, И. В. Макарова // *Теория и технология металлургического производства*. – 2013. – №1 (13). – С. 67–70.

References

1. Lin X., Peng Zh., Yan J., Li Zh., Hwang J.-Y., Zhang Y., Li G., Jiang T. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 149, pp. 1079–1100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>

2. Wang J., Zhang Y. I., Cui K., Fu T., Gao J., Hussain Sh., AlGarni T. S. Pyrometallurgical recovery of zinc and valuable metals from electric arc furnace dust – A review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 298, pp. 126788-1–126788-23. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126788>
3. Popov A. A. To the question about the problem of the zinc bearingsteelmaking dust utilization. *Naukovedenie* [Research on research], 2015, vol. 7, no. 2. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/124TVN215.pdf> (accessed 26 August 2021) (in Russian).
4. Doronin I. E., Svyazhin A. G. Commercial methods of recycling dust from steelmaking. *Metallurgist*, 2011, vol. 54, no. 9-10, pp. 673–681. <https://doi.org/10.1007/s11015-011-9356-z>
5. Letimin V. N., Makarova I. V., Vasileva M. S., Nasyrov T. M. Analysis of the ways for the disposal of gas cleaning dust and sludge at et the metallurgical enterprises. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva = Theory and Technology of Metallurgical Production*, 2015, no. 1, vol. 16, pp. 82–86 (in Russian).
6. Kovalenko A. M. About gas purification sludges of domain and steel smelting manufactures. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = East-European Journal of Advanced Technologies*, 2012, vol. 2, no. 12, pp. 4–8 (in Russian).
7. Demin A. V., Rozhkov A. I., Grudnickij O. M., Nikolaev V. V., Feklistov A. V. Finding ways of recycling dust of arc steel furnaces at the Belarusian metallurgic plant. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 3, pp. 74–79 (in Russian).
8. Wang L., Peng Z. Microwave-intensified treatment of low-zinc EAF dust: A route toward high-grade metallized product with a focus on multiple elements. *Powder Technology*, 2021, vol. 383, pp. 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.047>
9. Suetens Th., Klaasen B., Acker K. V., Blanpain B. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 2014, no. 65, pp. 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.053>
10. Li Y.-Ch., Zhuo Sh.-N., Peng B., Min X.-B., Liu H., Ke Y. Comprehensive recycling of zinc and iron from smelting waste containing zinc ferrite by oriented transformation with SO₂. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 263, pp. 121468-1–121468-8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121468>
11. Lanzerstorfer C. Electric arc furnace (EAF) dust: Application of air classification for improved zinc enrichment in in-plant recycling. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 174, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.312>
12. Naiyang Ma. Recycling of basic oxygen furnace steelmaking dust by in-process separation of zinc from the dust. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 112, pp. 4497–4504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.009>
13. Buitrago L. J. H., Prada I. D., Amaral-Labat G., Beneduce F. Microstructural, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2018, vol. 22, no. 2, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0343>
14. Pickle Christopher A., Marzoughi Omid. Thermodynamic Investigation of the Sulphation Roasting of Electric Arc Furnace Dust. *Minerals*, 2019, vol. 9(1), pp. 18–32. <https://doi.org/10.3390/min9010018>
15. Machado J. G. M. S., Brehm F. A., Moraes C. A., Carlos Alberto dos Santos, Vilela A. less. Characterization study of electric arc furnace dust phases. *Materials Research*, 2006, vol. 9, no. 1, pp. 41–45. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>
16. Fedoseeva E. N., Zanozina V. F., Zorin A. D., Samsonova L. E. Preparation of Iron Oxide Pigment from Metallurgical Production Dust for Use in Construction. *Metallurgist*, 2015, vol. 59, no. 5-6, pp. 374–379. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0112-7>
17. Bogdan E. O., Pauliukevich Yu. G., Laryionau P. S., Hundzilovich M. M., Chemik A. A. Comprehensive study of physical and chemical properties of dust of metallurgical production in order to determine the main directions of its processing. *Glass and Ceramics*, 2020, vol. 77, no. 5-6, pp. 183–189. <https://doi.org/10.1007/s10717-020-00266-9>
18. Rimoshevsky S. L., Prokopchuk D. A., Golub D. M. Investigation of the processes of dust processing gas cleaning of steelmaking industries. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 106–113 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-106-113>
19. Letimin V. N., Nasyrov T. M., Makarova I. V. Evaluation of pyrometallurgical methods for dezincification of dust and sludge from steelmaking plants. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva = Theory and technology of metallurgical production*, 2013, no. 1 (13), pp. 67–70 (in Russian).

Информация об авторах

Мацукевич Ирина Васильевна – канд. хим. наук, доцент, зав. лаб. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irinavas.k1975@gmail.com

Кулинич Наталья Владимировна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kulinich.55@yandex.by

Тавгень Вячеслав Владимирович – канд. техн. наук, вед. инженер. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Matsukevich Irina V. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irinavas.k1975@gmail.com

Kulinich Natalia V. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kulinich.55@yandex.by

Tauhen Viachaslau V. – Ph. D. (Engineering), Lead Engineer. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).