

## ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДИОКСИНОВ И ФУРАНОВ В ПРОЦЕССЕ УДАЛЕНИЯ ЦИНКА И СВИНЦА ИЗ ПЫЛИ ДСП\*

*Симонян Л.М., д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий  
и защиты металлов (lmsimonyan@yandex.ru)  
Демидова Н.В., магистрант (ndemidova\_n@mail.ru)*

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

**Аннотация.** Применение оцинкованного лома в качестве шихтового материала электросталеплавильного производства приводит к образованию металлургической пыли, пригодной для извлечения цветных металлов. Содержание хлора и органических соединений в металлошлаке может привести к образованию диоксинов и фуранов в процессе электроплавки с их последующим оседанием на электросталеплавильной пыли. В предыдущем исследовании авторами установлено содержание диоксинов и фуранов в пыли на уровне 474 нг/кг пыли. Для изучения поведения диоксинов и фуранов при нагреве пыли разработана методика проведения эксперимента в муфельной печи при температурах 300, 600, 900 и 1150 °С. Исследование химического состава пыли до и после проведения эксперимента позволило установить, что при нагреве происходит десорбция диоксинов и фуранов в интервале температур 300 – 900 °С. Параллельно с десорбцией диоксинов и фуранов протекает испарение некоторых химических соединений, косвенно наблюдаемое по изменению содержания С, Na, Cl, K, Pb, Zn в образцах. В изученном интервале температур содержание С, Na, Cl снижается до нуля; содержание К уменьшается на 81 %; Pb – на 83,5 %. Снижение содержания цинка не превышает 5 %. Изменение содержания остальных компонентов невелико. Полученные данные подтверждают преимущественное нахождение хлора в неорганических соединениях в виде NaCl и KCl, наряду с незначительным присутствием в форме ZnCl, PbCl и PbCl<sub>2</sub>. Исследование показало необходимость учета присутствия диоксинов и фуранов при создании технологий, направленных на переработку металлургической пыли. Предлагается вводить высокотемпературную обработку пыли (>850 °С) с последующим орошением отходящих газов известковым молочком. Наиболее рациональным представляется принятие мер по снижению эмиссии диоксинов и фуранов в ДСП: проведение дожигания отходящих газов с последующим резким охлаждением во избежание вторичного синтеза экотоксикантов или сокращение количества хлорсодержащих и органических материалов при предварительной подготовке металлошлакты.

**Ключевые слова:** сталеплавильная пыль, переработка пыли, хлор, диоксины, фураны, хлориды металлов, адсорбция.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-11-840-845

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс выплавки стали в электродуговых печах сопровождается выделением металлургической пыли в диапазоне 10 – 30 кг на тонну стали [1, 2]. Основными ее компонентами являются железо, цветные металлы, а также щелочные и щелочноземельные металлы (Na, K, Ca, Mg и т.д.). Использование оцинкованного лома в шихте приводит к резкому повышению содержания цинка и свинца в пыли ДСП [3, 4]. Содержание их может достигать 40 и 4 % соответственно [2, 3].

Сталеплавильная пыль представляет собой вторичный ресурс, пригодный для извлечения цветных металлов и вовлечения их в новый производственный цикл [5, 6]. Однако эффективность проведения данного процесса существенно снижается при наличии в металлургической пыли хлора [7]. По данным работы [8], содержание хлора в электросталеплавильной пыли составляет 1 – 5 %.

Хлор является чрезвычайно активным химическим элементом, преимущественно встречающимся в приро-

де в виде хлоридов щелочных или щелочноземельных металлов [9], однако согласно исследованиям [4, 7, 8], в электросталеплавильной пыли, как правило, он присутствует в форме хлоридов натрия и калия, которые имеют низкую температуру плавления (801 и 776 °С соответственно). В связи с этим, при пирометаллургических способах извлечения цинка и свинца из металлургической пыли происходит расплавление рассматриваемых хлоридов с низкой температурой эвтектики 665 °С [10]. Это приводит к снижению температуры испарения (кипения) расплава и возможности перехода в газовую фазу хлоридов натрия и калия при температурах ниже 1100 – 1300 °С. Возгоняющиеся пары конденсируются совместно с цинком и свинцом, что приводит к загрязнению извлекаемых цветных металлов [8].

В процессе электроплавки в присутствии углеродородного хлорсодержащего сырья и кислорода образуются диоксины и фураны [11, 12]. Максимальная скорость образования диоксинов и фуранов наблюдается в диапазоне температур от 300 до 800 °С с возможным превышением предельно допустимых концентраций в области от 200 до 1200 °С [13]. Диоксины и фураны представляют собой группу высокотоксичных органи-

\* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «УМНИК», договор № 12699ГУ/2017.

ческих веществ, оказывающих канцерогенное и тератогенное действия на живые организмы, снижающих их иммунную, репродуктивную и нейроэндокринную функции и провоцирующих острые хронические заболевания [14 – 16].

Значительный молекулярный вес диоксинов и фуранов, высокая адсорбционная способность в совокупности с высокой пористостью электросталеплавильной пыли приводит к их осаждению на поверхности пыли, что повышает ее токсичность [17, 18]. При пирометаллургических способах извлечения цинка и свинца из пыли ДСП возможна десорбция диоксинов и фуранов с поверхности. Это может привести как к превышению предельно допустимых концентраций диоксинов и фуранов в рабочей зоне, так и ускорению миграции диоксинов и фуранов в окружающей среде.

Целью работы является определение изменения содержания диоксинов и фуранов в электросталеплавильной пыли в процессе ее нагрева, разработка рекомендаций по проведению извлечения цинка и свинца из пыли ДСП с учетом присутствия в металлургической пыли диоксинов и фуранов.

#### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования показали, что содержание диоксинов и фуранов<sup>1</sup>, адсорбированных на пыли ПАО «Северсталь», составляет 474 нг/кг [19]. На основе предварительных исследований авторами разработана методика термической обработки образцов пыли в интервале температур 300 – 1150 °С.

Проведен анализ содержания элементов в пыли ДСП. Общий элементный состав пыли определяли методами рентгенофлуоресцентной спектрометрии, содержание цинка и свинца – атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой, содержание углерода и серы – сжиганием в токе кислорода с последующей ИК-спектроскопией, содержание влаги – методом гравиметрии в ООО «АНСЕРТЭКО»<sup>2</sup>. Элементный состав<sup>3</sup>, % (по массе): 40,0 Fe; 13,7 Zn; 0,8 Pb; 1,74 C; 0,47 S; 6,0 Ca; 2,6 Mn; 1,3 Si; 2,8 Na; 1,5 Mg; 1,8 Cl; 1,0 K; 0,2 Al; 0,1 P; 0,2 Cr; 0,2 Cu; 0,05 Ti. Остальное – предположительно кислород. Влага в образцах не превышала 0,25 %.

#### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нагрев и выдержку образцов пыли из рукавных фильтров ПАО «Северсталь» проводили в муфельной

<sup>1</sup> ПНД Ф 16.1:2.2:3.56-08 (ФР.1.31.2014.17405). Методика измерений массовой доли полихлорированных дибензо-*n*-диоксинов и дибензофуранов в почвах, грунтах, илах, донных отложениях, шлаках, летучей золе методом хромато-масс-спектрометрии. Лаборатория аналитической экотоксикологии ИПЭЭ РАН им. А.Н. Северцова.

<sup>2</sup> ООО «Аналитический сертификационный и эколого-аналитический центр «Ансертэко».

<sup>3</sup> Относительное стандартное отклонение 2 – 7 %; нижняя граница определяемых веществ 0,05 %.

печи СНОЛ 3/11-В, оснащенной вытяжкой, при воздушной атмосфере.

Обработку образцов выполняли при пяти значениях температуры: 300, 600, 900, 1150 °С. При каждой температуре она осуществлялась отдельно. Скорость нагрева составляла 5 °С/мин, начальная температура – 25 °С, длительность выдержки – 1 ч.

Для равномерного нагрева пыли по высоте навеску пыли (150 г) укладывали в шесть алундовых тиглей<sup>4</sup> равными слоями (по 25 г в каждый). Схема расположения тиглей в муфельной печи представлена на рис. 1.

Высота слоя составляла примерно 2,5 – 3,0 см. Тигли с образцами пыли помещали в муфельную печь, затем нагревали и выдерживали 1 ч. После извлечения образцов пыли из муфельной печи их помещали в эксикатор для охлаждения (на сутки). Массу навески пыли после термической обработки определяли на весах MW-II-300 с точностью ±0,005 г.

Убыль массы определяли по разности до и после термической обработки. После нагрева при температурах 300 и 600 °С исследуемая пыль остается в рассыпчатом виде, но незначительно меняет цвет. При 900 °С происходит спекание частичек пыли, которое легко разрушается при небольшом усилии. При 1150 °С металлургическая пыль спекается в единый монолит, обладающий высокой прочностью. Образцы металлургической пыли до и после эксперимента представлены на рис. 2.

Все образцы до и после проведения эксперимента были направлены в профильную лабораторию аналитической экотоксикологии для определения содержания диоксинов и фуранов.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИНОВ И ФУРАНОВ В ПЫЛИ ДСП

Метод основан на экстракции полихлорированных дибензо-*n*-диоксинов и дибензофуранов органическими растворителями из проб, в которые предваритель-



Рис. 1. Схема расстановки тиглей в муфельной печи

Fig. 1. Crucibles arrangement in the muffle furnace

<sup>4</sup>  $D = 52$  мм;  $d = 26$  мм;  $H = 38$  мм.

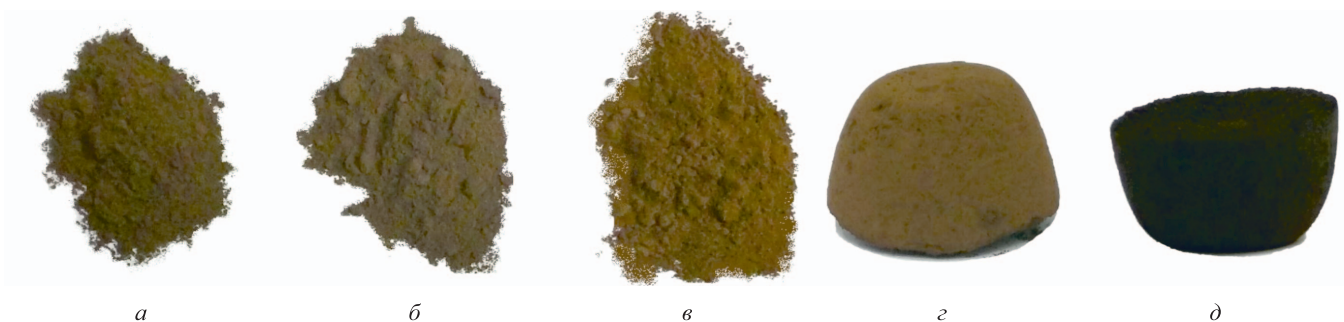


Рис. 2. Образцы металлургической пыли до (а) и после проведения эксперимента при  $T$ , °C: 300 (б); 600 (в); 900 (г); 1150 (д)

Fig. 2. Samples of metallurgical dust before (a) and after experiment at  $T$ , °C: 300 (б); 600 (в); 900 (г); 1150 (д)

но введены изотопно-меченые стандарты-имитаторы, очистке экстракта от сопутствующих соединений, мешающих определению полихлорированных дибензо-*n*-диоксинов и дибензофуранов, и последующем их количественном определении с помощью сочетания высокоэффективной капиллярной газовой хроматографии и масс-спектрометрии высокого разрешения.

Для проведения анализа пробы предварительно высушивают до воздушно-сухого состояния при температуре не более 35 °C и измельчают до размера частиц менее 0,25 мм. Масса анализируемой пробы в зависимости от содержания диоксинов и фуранов составляет 1 – 50 г. Перед экстракцией в пробу вносят изотопно-меченые внутренние стандарты-имитаторы (СИ-1 и ВСИ-1а или ВСИ-1) в количестве 100 – 200 пг, разбавленные 1 см<sup>3</sup> 95%-ного раствора ацетона. Экстракция протекает в аппарате Сокслета. Очистка экстракта осуществляется на хроматографических колонках. Экстракт упаривают до объема около 2 см<sup>3</sup> на ротационном испарителе.

Калибровка прибора и построение градуировочных прямых производится по контрольной пробе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ

#### ДИОКСИНОВ И ФУРАНОВ В ПЫЛИ ДСП ПРИ НАГРЕВЕ И ВЫДЕРЖКЕ

Результаты анализа содержания диоксинов и фуранов в пыли ДСП при ее нагреве и выдержке приведены ниже:

Температура, °C	Содержание ДиФ, нг/кг пыли
25	474
300	440
600	0,35
900	0,1
1150	0,1

Можно видеть, что при нагреве образцов пыли до 300 °C содержание диоксинов и фуранов в ней меняется незначительно. При нагреве в диапазоне темпе-

ратур 300 – 600 °C содержание диоксинов и фуранов существенно снижается до 0,35 нг/кг пыли. Затем (температура 600 – 900 °C) содержание диоксинов и фуранов уменьшается до 0,1 нг/кг пыли. К этому моменту содержание диоксинов и фуранов снижается на 99,9 %. Дальнейший нагрев не приводит к изменению содержания диоксинов и фуранов в пыли ДСП.

Динамика изменения содержания диоксинов и фуранов, а также интенсивность их удаления из пыли представлены на рис. 3.

Отметим, что интенсивность удаления диоксинов и фуранов плавно возрастает на интервале температур 25 – 600 °C, достигая максимума. При температурах 600 – 900 °C интенсивность удаления диоксинов и фуранов резко снижается до практически нулевых значений, которые сохраняются и при температуре 1150 °C.

Разрушение диоксинов и фуранов протекает при температурах свыше 800 – 850 °C [11, 15], поэтому можно предположить, что диоксины и фураны десорбируют с поверхности исследуемой пыли при температурах свыше 300 °C.

Поведение других компонентов, содержащихся в пыли ДСП, приведено на рис. 4.

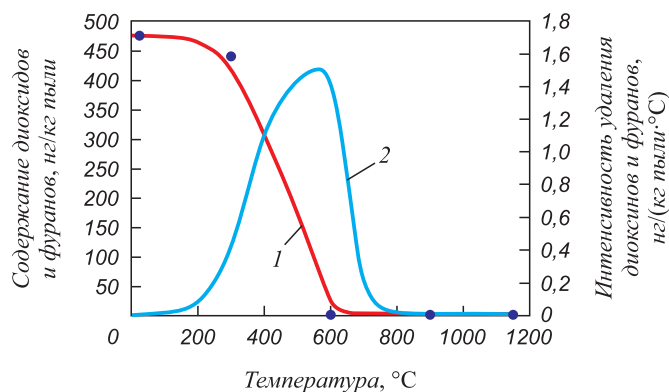


Рис. 3. Изменение содержания диоксинов и фуранов в пыли ДСП при ее нагреве и выдержке: 1 – экспериментальные данные; 2 – интенсивность удаления диоксинов и фуранов

Fig. 3. Changes in the content of dioxins and furans in EAF dust particle during its heating and exposure: 1 – experimental data; 2 – removal rate of dioxins and furans

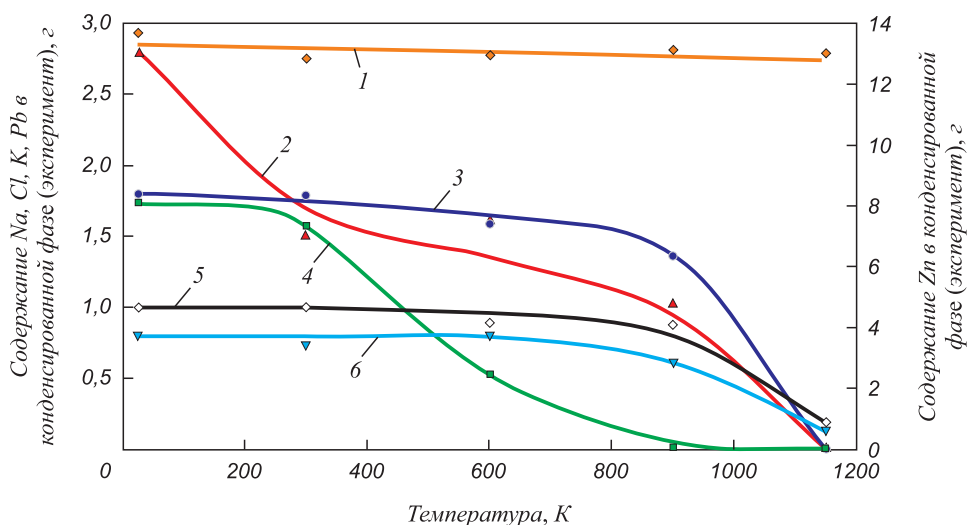


Рис. 4. Динамика содержания Zn (1), Na (2), Cl (3), C (4), K (5), Pb (6) в пыли ДСП при ее нагреве и выдержке

Fig. 4. Dynamics of the content of Zn (1), Na (2), Cl (3), C (4), K (5), Pb (6) in EAF dust particle during its heating and exposure

В ходе проведения эксперимента установлено, что при нагреве пыли до 1150 °С содержание в ней C, Na, Cl снижается до нуля; содержание K уменьшается на 81 %; Pb – на 83,5 %. Снижение содержания цинка не превышает 5 %. Изменение содержания остальных компонентов невелико. Полученные данные подтверждают преимущественное нахождение хлора в неорганических соединениях в виде NaCl и KCl, наряду с незначительным присутствием в форме ZnCl<sub>2</sub>, PbCl<sub>2</sub> и PbCl<sub>4</sub> [5, 7].

## Выводы

Диоксины и фураны, образующиеся в процессе электросталеплавильного производства, частично оседают на металлургической пыли, повышая ее токсичность. Работа с таким продуктом, особенно его нагрев свыше 300 °С, сопровождается десорбцией диоксинов и фуранов, представляющих опасность для окружающей среды и организма человека, поэтому контакт с пылью должен проводиться в помещениях, оборудованных системой газоочистки, а сотрудники, непосредственно работающие с ней, должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты (кожи и органов дыхания).

Разрушение диоксинов и фуранов протекает преимущественно при температуре 800 – 850 °С, что необходимо учитывать при создании технологий, направленных на переработку металлургической пыли: вводить высокотемпературную обработку пыли (>850 °С) с последующим орошением отходящих газов известковым молочком.

Наиболее рациональным представляется принятие мер по снижению эмиссии диоксинов и фуранов при выплавке стали в ДСП. Самый простой вариант – проведение дожигания отходящих газов с последующим резким охлаждением во избежание вторичного синтеза

экотоксикантов [20]. Более эффективный вариант – сокращение количества хлорсодержащих и органических материалов при предварительной подготовке металлошихты. Исследования [21] подтверждают экономическую эффективность предварительной подготовки металлошихты в сравнении с организацией мероприятий по снижению содержания диоксинов и фуранов в отходящих газах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mohammad Al-Harashsheha, Awni Al-Otoom, Leema Al-Makhadmah, Ian E. Hamilton, Sam Kingman, Sameer Al-Asheha, Muhanned Hararah. Pyrolysis of poly (vinyl chloride) and–electric arc furnace dust mixtures // Journal of Hazardous Materials. 2015. No. 299. P. 425 – 436.
2. Mohammad Al-harashsheh, Jomana Al-Nu'airat, Awni Al-Otoom etc. Treatments of electric arc furnace dust and halogenated plastic wastes: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019. Vol.7. No 1. Article 102812.
3. Mamdouh Omran, Timo Fabritius. Utilization of blast furnace sludge for the removal of zinc from steelmaking dusts using microwave heating // Separation & Purification Technology. 2019. No. 210. P. 867 – 884.
4. Bruckard W.J., Davey K.J., Rodopoulos T. etc. Water leaching and magnetic separation for decreasing the chloride level and upgrading the zinc content of EAF steelmaking baghouse dusts // International Journal of Mineral Processing. 2005. No. 75. P. 1 – 20.
5. Xiaolong Lin, Zhiwei Peng, Jiaying Yan etc. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust // Journal of Cleaner Production. 2017. No. 149. P. 1079 – 1100.
6. Gomez E., Amutha Rani D., Cheeseman C.R. etc. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review // Journal of Hazardous Materials. 2009. No. 161. P. 614 – 626.
7. Wei-Sheng Chen, Yun-Hwei Shen, Min-Shing Tsai, Fang-Chih Chang. Removal of chloride from electric arc furnace dust // Journal of Hazardous Materials. 2011. No. 190. P. 639 – 644.
8. Pedro Jorge Walburga Keglevich de Buzina, Nestor Cezar Heckb, Antônio Cezar Faria Vilelac. EAF dust: An overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes // Journal of Materials Research & Technology. 2016. No. 4. P. 194 – 202.

9. Бердников В.И., Гудим Ю.А. Условия образования диоксинов при высокотемпературном сжигании хлорсодержащих материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 2. С. 77 – 82.
10. Utigard T.A., Friesen K., Roy R.R. etc. The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing // The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS). 1998. No. 11. P. 38 – 43.
11. Pedro Antunes, Paula Viana, Tereza Vinhas etc. Emission profiles of polychlorinated dibenzodioxins, polychlorinated dibenzofurans (PCDD/Fs), dioxin-like PCBs and hexachlorobenzene (HCB) from secondary metallurgy industries in Portugal // Chemosphere. 2012. No. 88. P. 1332 – 1339.
12. Haifeng Li, Wenbin Liu, Chen Tang etc. Emission profiles and formation pathways of 2,3,7,8-substituted and non-2,3,7,8-substituted polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in secondary copper smelters // Science of the Total Environment. 2019. No. 649. P. 473 – 481.
13. Кузнецов Н.П., Тетенев В.А., Хайбулин Р.Г. Технические решения по предотвращению образования диоксинов при термической утилизации промышленных отходов // Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных отходов. 2014. № 2. С. 7 – 12.
14. Mukherjee A., Debnath B., Sadhan Kumar Ghosh. A review on technologies of removal of dioxins and furans from incinerator flue gas // Procedia Environmental Sciences. 2016. No. 35. P. 528 – 540.
15. Davy C.W. Legislation with respect to dioxins in the workplace // Environment International. 2004. No. 30. P. 219 – 233.
16. Brenda Eskenazi, Marcella Warner, Paolo Brambilla etc. The Seveso accident: A look at 40 years of health research and beyond // Environment International. 2018. No. 121. P. 71 – 84.
17. Rezaei E., Farahani A., Buekens A. etc. Dioxins and furans releases in Iranian mineral industries // Chemosphere. 2013. No. 91. P. 838 – 843.
18. Мещеряков А.В. Рукавные фильтры для металлургии на европейский уровень качества // Сб. докл. IV Междунар. конф. «Металлургия – ИНТЕХЭКО – 2011» (Москва, 29 – 30 марта 2011 г.). – М.: ООО «ИНТЕХЭКО», 2011. С. 77 – 79.
19. Симонян Л.М., Демидова Н.В. Диоксины и фураны в цинко-содержащей металлургической пыли: процессы формирования и поведение // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 7. С. 557 – 563.
20. Караченцова А.Н., Пономарев А.Я. Проблемные вопросы обеспечения экологической безопасности при утилизации хлорорганических пестицидов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2014. № 4. С. 208 – 213.
21. Корнеев С.В., Кабишов С.М. Экологические аспекты использования металлолома в металлургическом производстве // Литье и металлургия. 2015. № 4. С. 123 – 130.

Поступила в редакцию 19 марта 2019 г.  
 После доработки 28 марта 2019 г.  
 Принята к публикации 2 октября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 11, PP. 840–845.

## DIOXINS AND FURANS' BEHAVIOR IN THE PROCESS OF ZINC AND LEAD REMOVING FROM EAF DUST

*L.M. Simonyan, N.V. Demidova*

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),  
 Moscow, Russia

**Abstract.** The use of galvanized scrap as a charge material for electric steel-smelting production leads to formation of metallurgical dust suitable for extraction of non-ferrous metals. Chlorine and organic compounds content in metallurgical charge can lead to dioxins and furans formation in the process of electric smelting with their subsequent sedimentation on EAF dust. In the previous study we determined dioxins and furans content in dust at the level of 474 ng/kg of EAF dust. The methodology for conducting an experiment in a muffle furnace at temperatures of 300, 600, 900 and 1150 °C was developed for the study of dioxins and furans' behavior during dust heating. Investigation of EAF dust chemical composition before and after the experiment made it possible to establish that desorption of dioxins and furans occurs during heating in the temperature range of 300 – 900 °C. In parallel with dioxins and furans' desorption some chemical compounds evaporate indirectly and it is determined by calculation of changes in the content of C, Na, Cl, K, Pb, Zn in the sample. In the studied temperature range, the content of C, Na, Cl decreases to zero; K content is reduced by 81 %; Pb content is reduced by 83.5 %. Reduction of Zn content does not exceed 5 %. Change in content of the remaining components is insignificant. The obtained data confirm the predominant presence of chlorine in inorganic compounds in forms of NaCl and KCl, along with a slight presence in forms of ZnCl, PbCl, and PbCl<sub>2</sub>. The study revealed the need of consideration of dioxins and furans' presence during development of technologies aimed at metallurgical dust processing. It is proposed to perform high-temperature processing of dust (>850 °C) with the subsequent irrigation of exhaust gases with lime milk. The most rational ways to decrease dioxins and furans' content in EAF dust are conducting afterburning of exhaust gases, followed by rapid cooling in order to avoid secondary synthesis of ecotoxicants or re-

ducing the amount of chlorine-containing and conventional materials during pretreatment of metals.

**Keywords:** steel-making dust, dust processing, chlorine, dioxins, furans, metal chlorides, adsorption.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-11-840-845

### REFERENCES

1. Mohammad Al-Harahsheha, Awni Al-Otoom, Leema Al-Makhadmah, Ian E. Hamilton, Sam Kingman, Sameer Al-Asheha, Muhammad Hararah. Pyrolysis of poly(vinyl chloride) and–electric arc furnace dust mixtures. *Journal of Hazardous Materials*. 2015, no. 299, pp. 425–436.
2. Mohammad Al-harahsheh, Jomana Al-Nu'airat, Awni Al-Otoom, Isra'a Al-hammouri, Huda Al-jabali, Mais Al-zoubi, Shaima'a Abu Al'asal. Treatments of electric arc furnace dust and halogenated plastic wastes: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019, vol. 7, no. 1, article 102812.
3. Mamdouh Omran, Timo Fabritius. Utilization of blast furnace sludge for the removal of zinc from steelmaking dusts using microwave heating. *Separation & Purification Technology*. 2019, no. 210, pp. 867–884.
4. Bruckard W.J., Davey K.J., Rodopoulos T., Woodcock J.T., Italia-no J. Water leaching and magnetic separation for decreasing the chloride level and upgrading the zinc content of EAF steelmaking baghouse dusts. *International Journal of Mineral Processing*. 2005, no. 75, pp. 1–20.
5. Xiaolong Lin, Zhiwei Peng, Jiaying Yan, Zhizhong Li, Jiann-Yang Hwang, Yuanbo Zhang, Guanghui Li, Tao Jiang. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. *Journal of Cleaner Production*. 2017, no. 149, pp. 1079–1100.
6. Gomez E., Amutha Rani D., Cheeseman C.R., Deegan D., Wise M., Boccacini A.R. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 2009, no. 161, pp. 614–626.

7. Wei-Sheng Chen, Yun-Hwei Shen, Min-Shing Tsai, Fang-Chih Chang. Removal of chloride from electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2011, no. 190, pp. 639–644.
8. Pedro Jorge Walburga Keglevich de Buzina, Nestor Cezar Heckb, Antônio Cezar Faria Vilelac. EAF dust: An overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes. *Journal of Materials Research & Technology*. 2016, no. 4, pp. 194–202.
9. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Conditions for formation of dioxins at high-temperature combustion of chlorine-containing materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 2, pp. 77–82. (In Russ.).
10. Utigard T.A., Friesen K., Roy R.R., Lim J., Silny A., Dupuis C. The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*. 1998, no. 11, pp. 38–43.
11. Pedro Antunes, Paula Viana, Tereza Vinhas, J. Rivera, Elvira M.S.M. Gaspar. Emission profiles of polychlorinated dibenzodioxins, polychlorinated dibenzofurans (PCDD/Fs), dioxin-like PCBs and hexachlorobenzene (HCB) from secondary metallurgy industries in Portugal. *Chemosphere*. 2012, no. 88, pp. 1332–1339.
12. Haifeng Li, Wenbin Liu, Chen Tang, Rongrong Lei, Wen Zhu. Emission profiles and formation pathways of 2,3,7,8-substituted and non-2,3,7,8-substituted polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in secondary copper smelters. *Science of the Total Environment*. 2019, no. 649, pp. 473–481.
13. Kuznetsov N.P., Tetenev V.A., Khaibulin R.G. Technical solutions to prevent the formation of dioxins during thermal disposal of industrial waste. *Obezvrezhivanie, utilizatsiya i pererabotka promyshlennykh otkhodov*. 2014, no. 2, pp. 7–12. (In Russ.).
14. Mukherjee A., Debnath B., Sadhan Kumar Ghosh. A review on technologies of removal of dioxins and furans from incinerator flue gas. *Procedia Environmental Sciences*. 2016, no. 35, pp. 528–540.
15. Davy C.W. Legislation with respect to dioxins in the workplace. *Environment International*. 2004, no. 30, pp. 219–233.
16. Brenda Eskenazi, Marcella Warner, Paolo Brambilla, Stefano Signorini, Jennifer Ames, Paolo Mocarelli. The Seveso accident: A look at 40 years of health research and beyond. *Environment International*. 2018, no. 121, pp. 71–84.
17. Rezaei E., Farahani A., Buekens A., Chen T., Lu S.Y., Habibinejad M., Damercheli F., Andalib Moghadam S.H., Gandomkar M., Bahmani A. A. Dioxins and furans releases in Iranian mineral industries. *Chemosphere*. 2013, no. 91, pp. 838–843.
18. Meshcheryakov A.V. Baghouses for metallurgy of European quality level. In: *Sb. dokl. 4 Mezhdunarodnoi konf. «Metallurgiya – INTEKHEKO – 2011» 29 – 30 marta 2011g., Moskva* [Proc. 4th Int. Conf. “Metallurgiya – INTEKHEKO – 2011”, March 29 – 30, 2011, Moscow]. Moscow: 2011, pp. 77–79. (In Russ.).
19. Simonyan L.M., Demidova N.V. Dioxins and furans in zinc-containing metallurgical dust: behavior and formation processes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 7, pp. 557–563. (In Russ.).
20. Karachentsova A.N., Ponomarev A.Ya. Problematic issues of environmental safety during organochlorine pesticides disposal. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*. 2014, no. 4, pp. 208–213. (In Russ.).
21. Korneev S.V., Kabishov S.M. Ecological aspects of metal scrap use in metallurgical industry. *Lit'e i metallurgiya*. 2015, no. 4, pp. 123–130. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Foundation of Innovations Promotion for the UMNIC program, the agreement No. 12699GU/2017.

**Information about the authors:**

**L.M. Simonyan**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection (lmsimonyan@yandex.ru)

**N.V. Demidova**, MA Student (ndemidova\_n@mail.ru)

Received March 19, 2019

Revised March 28, 2019

Accepted October 2, 2019