

УДК 504.064.4:658.567.1

ТОКСИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ОТВАЛЬНОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА

*Хоботова Э.Б.¹, д.х.н., профессор кафедры технологии дорожно-строительных материалов
и химии (elinahobotova@gmail.com)*

*Игнатенко М.И.¹, к.т.н., доцент кафедры технологии дорожно-строительных материалов
и химии (m_ignatenko@ukr.net)*

Калюжная Ю.С.¹, к.т.н., доцент кафедры экологии (uskalmikova@gmail.com)

*Грайворонская И.В.¹, к.т.н., доцент кафедры метрологии и безопасности
жизнедеятельности (inna_gra@ukr.net)*

Ларин В.И.², д.х.н., директор Научно-исследовательского института химии (ndichem@karazin.ua)

¹ Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
(61002, Украина, Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25)

² Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
(61022, Украина, Харьков, пл. Свободы, 4)

Аннотация. Металлургические шлаки накапливаются в больших количествах. Для дальнейшей утилизации они должны обладать необходимыми техническими свойствами. Как один из основных факторов выступает химический и минеральный составы шлаков, оказывающие влияние на их конечные свойства. Элементный состав отвального доменного шлака ПАО «Запорожсталь», определенный методом электронно-зондового микроанализа, позволяет охарактеризовать фракции шлака с точки зрения токсичности. Элементы калий, натрий, сера, хлор, медь и титан, которые не входят в состав минералов, зарегистрированы сканирующим электронным микроскопом. Это позволяет предположить, что они сорбируются поверхностью минеральных частиц. Максимальное содержание калия, натрия и титана характерно для фракции 2,5 – 5,0 мм. Шлак содержит незначительное (менее 1 %) количество железа, титана и меди, которые относятся к третьему классу опасности вещества; это не препятствует дальнейшему использованию шлака. Определен третий класс опасности отвального доменного шлака. Гамма-спектрометрическим методом определены удельные активности и эффективные удельные активности гранулометрических фракций шлака. Обнаружены природные радионуклиды ⁴⁰K, ²²⁶Ra и ²³²Th. Доказано, что шлак и его отдельные фракции относятся к первому классу радиационной опасности и могут быть использованы в строительстве без ограничений. Отвальный доменный шлак ПАО «Запорожсталь» характеризуется высокой гидравлической активностью с увеличением поглощения оксида кальция CaO во времени. Отвальный доменный шлак может быть рекомендован для производства вяжущих (портландцемента и шлакопортландцемента) по совокупности химических параметров: по отношению к умеренно опасным отходам производства, первому классу радиационной опасности и проявлению высокой гидравлической активности.

Ключевые слова: отвальный доменный шлак, элементный состав, токсичность, класс опасности вещества, радиоактивность, природные радионуклиды, гидравлическая активность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-693-698

ВВЕДЕНИЕ

Металлургические шлаки накапливаются в больших количествах. Для дальнейшей утилизации они должны обладать необходимыми техническими свойствами, химическим и минеральным составом. Металлургические предприятия корректируют качество шлаков при выборе сырья, оптимизации обработки жидкого шлака и всего технологического процесса [1]. Гранулированный доменный и сталеплавильный шлаки нашли применение в гражданском и дорожном строительстве, производстве бетона, цемента, в качестве армирующих камней для гидротехнических сооружений, при стабилизации берегов, как сорбенты при очистке сточных вод [2]. Исследовано влияние различных условий охлаждения на свойства стеклообразных стальных

шлаков в отношении их выщелачивания и объемной стабильности [3]. Изменения в структуре стального шлака отражают процесс постепенного растворения и реагирования извести с оксидом SiO₂ до образования соединения 3CaO·SiO₂ [4].

Не так тщательно изучены отвальные доменные шлаки. Они заменяют портландцемент в бетонных материалах с целью повышения долговечности и повышения прочности, сохранения ресурсов и экономии энергии [5]. Исследование физических и химических свойств доменной пыли показало ее пригодность для асфальтобетонных смесей в строительстве дорог [6]. В работе [7] сопоставлен химический состав, основность, гидравлические свойства, температура плавления и морфология поверхности частиц доменного и купольного шлаков, определяющие различия в их

использовании. В некоторых случаях гидравлическая активность отвального доменного шлака достаточна для использования при изготовлении вяжущих (пуццоланового цемента, золо-шлако-известкового вяжущего, добавки к портландцементу) [8, 9]. Гидравлическая активность определяет направление использования шлаков. На примере гранулированных доменных шлаков доказано уменьшение гидравлической активности во времени, полученная аналитическая зависимость позволяет определить активность шлака в определенный момент времени [10]. Способ охлаждения может влиять на гидравлические свойства шлака, которые коррелируют с содержанием стеклофазы. Зарегистрирована более высокая концентрация аморфных соединений в шлаках с охлаждением водой или жидким азотом [11]. Время сохранения тепла является фактором, определяющим гидравлическую активность, а содержание стеклофазы зависит от температуры нагнетания шлака [12].

Химический состав существенно влияет на скрытую гидравлическую активность отвальных доменных шлаков. Оптимальная гидравлическая активность зарегистрирована при следующем составе шлака: 47 % CaO; 20 % Al_2O_3 ; 33 % SiO_2 [13]. Реакционная способность доменного шлака зависит от химического и гранулометрического составов, содержания стеклофазы, теплоты гидратации и развития микроструктуры [14]. Гидравлическая активность доменного шлака может быть увеличена при активации несколькими способами [15]: в сильнощелочной среде при $pH = 11,8 \div 12,2$ с добавлением гидроксида кальция и его растворимых солей (хлорида, бромиды, нитрата, формиата и ацетата). Наличие гидравлической активности шлаков легло в основу разработки способов получения на их основе шлакощелочных вяжущих [16].

Металлургические шлаки содержат примеси, которые могут быть токсичными и представлять экологическую опасность. Содержание бария и свинца в отвальных доменных шлаках составляет 611 и 8 мг/кг шлака [17]; обнаружены следующие элементы: As, Au, Ba, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Hf, La, Mn, Mo, Rb, Sb, Sc, Sm, V, W и Zn [18]; S, P, Mn, Cr, Sr, Zn, Ba, Ti [19]. Не найдено корреляции между минеральным составом, долей кристаллического состояния вещества, структурами доменных и сталелитейных шлаков и концентрацией примесных элементов [20]. В доменных шлаках концентрация ниобия широко варьируется, но не превышает 15 мг/кг, концентрация тантала менее 1 мг/кг, скандия менее 17 мг/кг, иттрия около 30 мг/кг. Кроме того, обнаружены редкоземельные элементы (РЗЭ) 0,5 – 36,6 мг/кг [20].

Количество элементов, выбрасываемых в окружающую среду, не всегда соответствует объемному химическому составу шлаков. Выщелачивание металлов-примесей из доменных шлаков менее интенсивное, чем из шлаков цветной металлургии в результате образования в них щелочной среды [21]. Металлы (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Se, V и Zn) были выщелочены из

стального шлака, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb и Zn показали меньшую выщелачиваемость. Токсичные металлы As, Cd, Se и V не выщелачивались с помощью тестов на выщелачивание и токсичность [22]. Большинство металлов прочно связаны с матрицей шлака, поэтому их концентрация в почвах вблизи шлаковых отвалов меньше, чем в шлаке [23].

Шлаки различного происхождения являются концентраторами естественных радионуклидов (ЕРН). Показаны возможности использования металлургических шлаков в гражданском и дорожном строительстве по показателям радиоактивности [24]. Концентрации ЕРН урана, тория и калия в шлаках производства чугуна и стали можно сопоставить с радиоактивностью известняка и доломита. Определено, что активность ЕРН ниже максимально допустимых уровней, установленных нормами Румынии [18]; для отвального доменного шлака (Великобритания) $^{210}Pb < 50$ Бк/кг, $^{226}Ra - 240$ Бк/кг [17].

Целью настоящей работы является исследование токсичности и гидравлической активности отвального доменного шлака ПАО «Запорожсталь» как параметров, определяющих ресурсную ценность шлака.

Задачи исследования – изучить элементный и радионуклидный состав отвального доменного шлака; рассчитать индекс токсичности и класс опасности шлака; определить гидравлическую активность шлака.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Элементный состав отвального доменного шлака определяли методом электронно-зондового микроанализа на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390 LV, имеющем систему микрорентгеновского анализа INCA. Гамма-спектрометрический анализ шлака проводили на сцинтилляционном гамма-спектрометре SEG-001.

Идентификацию кислотности поверхностных слоев частиц шлака проводили с помощью pH -метра (милливольтметра), который содержит твердофазный селективный электрод и модифицированный электрод сравнения в полипропиленовых корпусах. Гидравлическая активность определена по количеству поглощенной извести CaO [25].

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ОТВАЛЬНОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА

По результатам электронно-зондового микроанализа рассчитан элементный состав фракций шлака (см. таблицу, рис. 1), который отражает общее содержание элементов, входящих в состав кристаллических и аморфных веществ. Результаты микрорентгеновского анализа фракций шлака четко коррелируют с результатами рентгенофазового анализа [26]. Химические элементы K, Na, S, Cl, Cu и Ti, которые не входят в состав

Микрорентгеновский анализ фракций отвального доменного шлака ПАО «Запорожсталь»

Micro-X-ray analysis of Zaporozhstal waste blast furnace slag fractions

Элемент	Доля, % (по массе), фракций отвального доменного шлака, мм		
	менее 0,63	2,5 – 5,0	более 20
Si	10,42	10,80	8,69
Ca	30,81	25,67	28,53
Al	1,65	1,87	1,10
Fe	0,92	0,66	0,18
S	2,12	2,04	2,64
Mg	0,84	0,97	0,72
K	0,53	0,57	0,33
Na	0,33	0,38	–
Cu	0,50	–	–
Ti	0,17	0,18	0,10
Cl	–	–	0,08
O	51,70	51,69	57,63

минералов, зарегистрированы сканирующим электронным микроскопом; это позволяет предположить, что поверхности минеральных частиц сорбируют их. Например, максимальное содержание калия, натрия и титана характерно для фракции 2,5 – 5,0 мм. Шлак ПАО «Запорожсталь» содержит незначительное (менее 1 %) количество соединений железа, титана и меди (см. таблицу), которые относятся к третьему классу опасности веществ. Однако это не препятствует дальнейшему использованию шлака.

КЛАСС ОПАСНОСТИ ОТВАЛЬНОГО

ДОМЕННОГО ШЛАКА ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

Для количественной оценки воздействия шлаковых отходов на окружающую среду используется метод оценки класса опасности промышленных отходов с учетом индекса токсичности [27]. Расчеты показывают, что индекс токсичности варьируется в пределах 4,3 – 5,4; это соответствует третьему классу опасности (умеренно опасные отходы), то есть отвальный доменный шлак ПАО «Запорожсталь» может быть использован как вторичное сырье в строительстве.

РАДИОНУКЛИДНЫЙ СОСТАВ ОТВАЛЬНОГО

ДОМЕННОГО ШЛАКА ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

Шлаки накапливают естественные радионуклиды. Гамма-спектрометрическим методом определены удельные активности ЕРН (C_i) и эффективные удельные активности (C_{ef}) гранулометрических фракций шлака (рис. 2). Обнаружены следующие естественные радио-

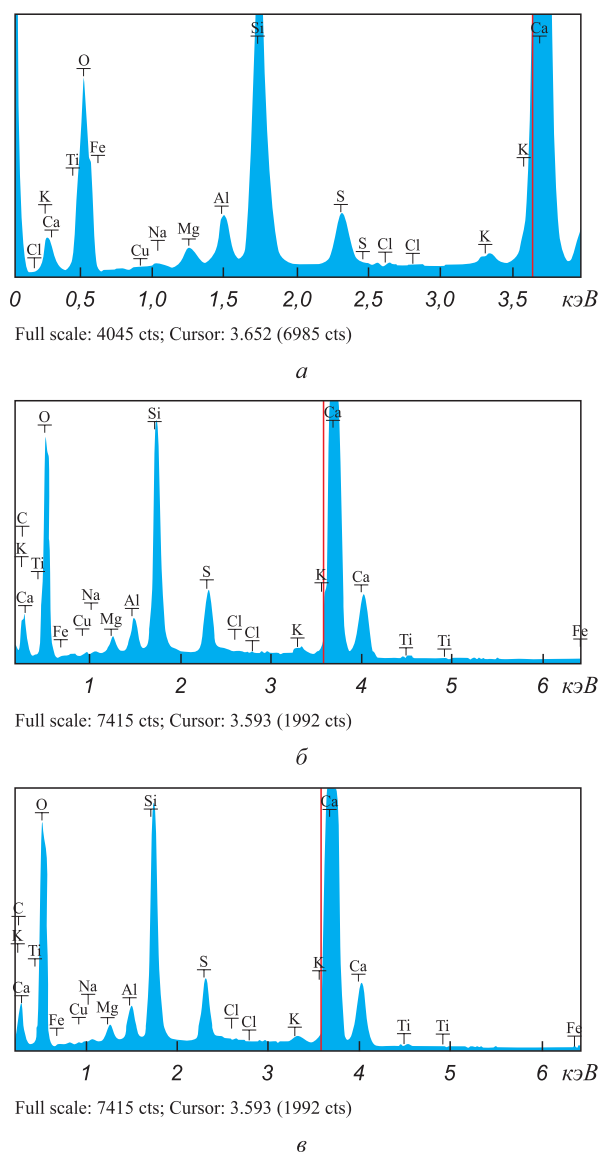


Рис. 1. Энергетический спектр отвального доменного шлака фракций менее 0,63 мм (а) – спектр 3, 2,5 – 5,0 мм (б) – спектр 5 и более 20 мм (в) – спектр 5

Fig. 1. Energy spectrum of dump blast furnace slag of fractions less than 0.63 mm (a) – spectrum 3, 2.5 – 5.0 mm (b) – spectrum 5 and more than 20 mm (c) – spectrum 5

нуклиды: ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th . Основной вклад в величину C_{ef} вносит радионуклид ^{226}Ra , затем – ^{232}Th . В работе [28] показано, что наиболее вероятным механизмом накопления ЕРН является гетеровалентное изоморфное замещение в структурах минералов отвальных доменных шлаков, находящихся в кристаллическом и аморфном состояниях.

Основной вклад в суммарную активность доменного шлака вносит изотоп ^{40}K , второй – ^{226}Ra , вклад радия превышает 20 %, что опасно по причине выделения радона. Фракции шлака имеют различную удельную активность. Повышенные удельные активности отмечены для фракций 1,25 – 2,50 и 2,5 – 5,0 мм. Наиболее радиационно-чистые фракции имеют частицы размером бо-

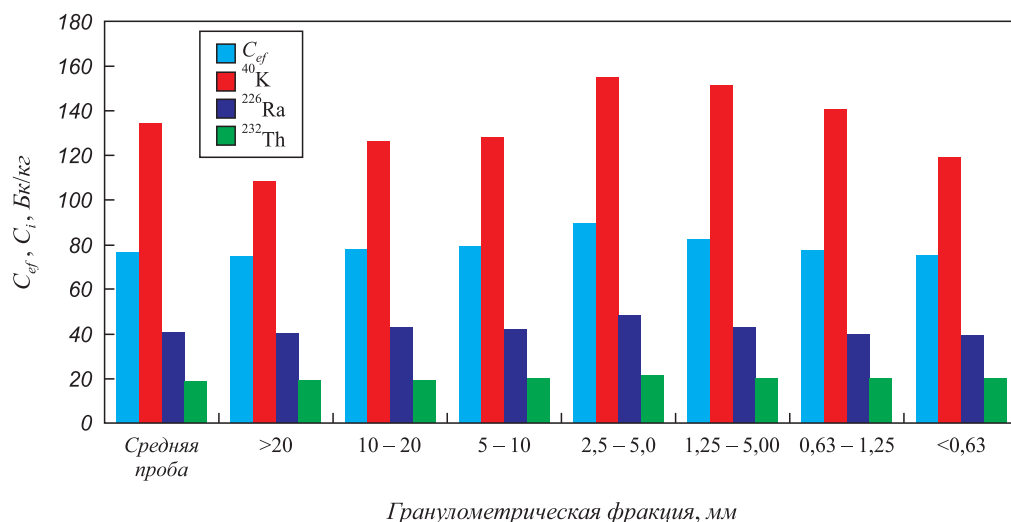


Рис. 2. Удельная активность и эффективная удельная активность для фракций отвалного доменного шлака ПАО «Запорожсталь»

Fig. 2. Volume activity and effective volume activities for Zaporozhstal waste blast furnace slag fractions

лее 10 и менее 0,63 мм. Наименьшее значение C_{ef} и низкое содержание ^{226}Ra относятся к фракции с размером частиц более 20 мм (74,3 Бк/кг). Согласно величине C_{ef} шлак и его отдельные фракции относятся к первому классу радиационной опасности ($C_{ef} \leq 370$ Бк/кг [29]) и могут использоваться в строительстве без ограничений.

Кислотность слабо варьируется по фракциям шлака: фракция менее 0,63 мм – $pH = 9,67$; 2,5 – 5,0 мм – $pH = 9,11$; более 20 мм – $pH = 8,17$.

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ОТВАЛЬНОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

Гидравлическая активность доменных шлаков является важным фактором, определяющим целесообразность их утилизации в производстве шлакопортландцемента. Получены экспериментальные результаты по определению гидравлической активности фракции шлака более 20 мм. При времени контакта 1, 7 и 14 сут. доменных шлаков с раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$ гидравлическая активность шлака по величине поглощения оксида CaO составляет 184, 227, 360 мг/г. Отвалный доменный шлак ПАО «Запорожсталь» проявляет высокую гидравлическую активность, поглощение оксида кальция увеличивается по времени. Содержание оксида CaO в шлаках, определенное по растворению в воде, равно 13,44 мг/г.

Выводы

Элементный состав шлака, определенный методом электронно-зондового микроанализа, позволяет охарактеризовать его фракции с точки зрения токсичности. Определен третий класс опасности отвалного доменного шлака. Расширена база данных по содержа-

нию природных радионуклидов в техногенном сырье. Установлено, что фракции шлака содержат ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Доказано, что шлак имеет первый класс радиационной опасности, что означает отсутствие ограничений на использование техногенного сырья в строительстве. Отвалный доменный шлак ПАО «Запорожсталь» проявляет высокую гидравлическую активность с увеличением поглощения оксида кальция во времени. Отвалный доменный шлак можно рекомендовать для производства вяжущих (портландцемента и шлакопортландцемента) по совокупности химических параметров (по отношению к умеренно опасным отходам производства, первому классу радиационной опасности и проявлению высокой гидравлической активности).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Motz H., Geiseler J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources // Waste Management. 2001. Vol. 21. No. 3. P. 285 – 293.
2. Хоботова Э.Б., Грайворонская И.В. Вторичное использование металлургических шлаков в качестве сорбентов при очистке сточных вод // Черные металлы. 2019. № 7. С. 55 – 61.
3. Tossavainen M., Engstrom F., Yang Q. etc. Characteristics of steel slag under different cooling conditions // Waste Management. 2007. Vol. 27. No. 10. P. 1335 – 1344.
4. Baricová D., Pribulová A., Futáš P. etc. Change of the chemical and mineralogical composition of the slag during oxygen blowing in the oxygen converter process // Metals. 2018. Vol. 8. No. 10. P. 844 – 857.
5. Ulubeyli G.C., Artir R. Sustainability for blast furnace slag: use of some construction wastes // World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship, Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2015. Vol. 195. P. 2191 – 2198.
6. Ochoa Díaz R. Blast furnace dust and phosphorous slag, new materials for use in road engineering // IOP Conference Series: Journal of Physics. 2017. Vol. 935. Article 012003.
7. Pribulova A., Futas P., Petrik J., Pokusová M. Comparison of cupola furnace and blast furnace slags with respect to possibilities of their utilization // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. No. 4. P. 1865 – 1873.

8. Khobotova E.B., Kalmykova Yu.S. Environmental and chemical grounds for the utilization of blast furnace slag in the production of binders // *Russian Journal of General Chemistry*. 2012. Vol. 82. No. 13. P. 2180 – 2188.
9. Боброва З.М., Ильина О.Ю., Хохряков А.В., Цейтлин Е.М. Применение отходов горно-металлургических и металлургических производств в целях рационального природопользования // *Изв. Уральского государственного горного университета*. 2015. Т. 40. № 4. С. 16 – 26.
10. Кравченко В.П. Оценка гидравлической активности доменных шлаков // *Вестник Приазовского государственного технического университета*. Серия: Технические науки. 2010. Вып. 20. С. 44 – 47.
11. Wang H., Cui S.P., Wang Y.L. Influence of cooling ways on the structure and hydraulic activity of blast furnace slag // *Key Engineering Materials*. 2015. Vol. 633. P. 234 – 239.
12. Wang H., Cui S.P., Wang Y.L. Influence of process conditions on the structure and hydraulic activity of air-cooling blast furnace slag // *Materials Science Forum*. 2015. Vol. 814. P. 476 – 482.
13. Chang P.-K., Lim Y. Effect of chemical composition on the latent hydraulic activity of blast furnace slag // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2000. Vol. 37. No. 5. P. 453 – 458.
14. Bougara A., Lynsdale C., Milestone N.B. Reactivity and performance of blastfurnace slags of differing origin // *Cement & Concrete composites*. 2010. Vol. 32. No. 4. P. 319 – 324.
15. Bellmann F., Stark J. Activation of blast furnace slag by a new method // *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39. No. 8. P. 644 – 650.
16. Калмыкова Ю.С., Хоботова Э.Б., Ларин В.И. Рациональные пути использования отвальных доменных шлаков // *Энергетика: экономика, технология, экология*. 2016. № 1. С. 44 – 50.
17. Molin F.D. Characterisation of radioactivity arising from the integrated steelworks in the UK and assessment of occupational exposure situations. A thesis submitted in fulfillment of the requirements of the University of Surrey for the degree of doctor of philosophy, 2018. – 281 p.
18. Ene A., Pantelici A. Characterization of metallurgical slags using low-level gamma-ray spectrometry and neutron activation analysis // *Romanian Journal of Physics*. 2011. Vol. 56. No. 7-8. P. 1011 – 1018.
19. Johnson W.J. The effect of chemical composition of blast-furnace slag on compressive strength and durability properties of mortar specimens. Graduate Theses and Dissertation, 2017. – 83 p.
20. Kasina M., Michalik M. Iron metallurgy slags as a potential source of critical elements – Nb, Ta and REE // *Mineralogia*. 2016. Vol. 47. No. 1-4. P. 15 – 28.
21. Piatak N.M., Parsons M.B., Seal II R.R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review // *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 57. P. 236 – 266.
22. Sasmita C., Biswajit P., Manish K. Short-term leaching study of heavy metals from LD slag of important steel industries in Eastern India // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2017. Vol. 19. No. 2. P. 851 – 862.
23. Proctor D.M., Fehling K.A., Shay E.C. etc. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags // *Environmental Science and Technology*. 2000. Vol. 34. No. 8. P. 1576 – 1582.
24. Žak A., Isajenko K., Piotrowska B. etc. Natural radioactivity of wastes // *Nukleonika*. 2008. Vol. 55. No. 3. P. 387 – 391.
25. ГОСТ 22688 – 77. Известь строительная. Методы испытаний. – М., 1977. – 19 с.
26. Хоботова Э.Б., Игнатенко М.И., Сторчак О.Г., Калужная Ю.С., Грайворонская И.В. Минеральный состав отвальных доменных шлаков // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 10. С. 774 – 781.
27. ДСанПіН 2.2.7.029 – 99. Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення. – Київ, 1999. – 21 с.
28. Хоботова Э.Б., Калмыкова Ю.С., Игнатенко М.И., Ларин В.И. Естественные радионуклиды доменных шлаков // *Черные металлы*. 2017. № 1. С. 23 – 28.
29. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ – 97) и основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений. – Киев, 1998. – 159 с.

Поступила в редакцию 20 января 2020 г.
После доработки 23 июня 2020 г.
Принята к публикации 20 июля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 9, pp. 693–698.

TOXIC PROPERTIES AND HYDRAULIC ACTIVITY OF DUMP BLAST FURNACE SLAG

*E.B. Khobotova¹, M.I. Ignatenko¹, Yu.S. Kalyuzhnaya¹,
I.V. Graivoronskaya¹, V.I. Larin²*

¹ Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine, Kharkiv

² V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine, Kharkiv

Abstract. Metallurgical slags accumulate in large quantities. For further disposal, they must have the certain technical properties. Among the main factors there are chemical and mineral compositions of slags, which affect their final properties. Elemental composition of Zaporozhstal dump blast furnace slag, determined by electron probe microanalysis, makes it possible to characterize the slag fractions in terms of toxicity. Potassium, sodium, sulfur, chlorine, copper and titanium, which are not part of the minerals, are recorded by scanning electron microscope; this suggests that they are sorbed by mineral particles surface. The maximum content of potassium, sodium and titanium is typical for the 2.5 – 5.0 mm fraction. Slag contains an insignificant (less than 1 %) amount of metals – iron, titanium and copper, which belong to the third hazard class of the substance; this does not impede further use of the slag. The third hazard class of dump blast furnace slag has been identified. Volume activities and effective volume activi-

ties of granulometric slag fractions have been determined by gamma-spectrometric method. ⁴⁰K, ²²⁶Ra and ²³²Th natural radio nuclides have been found. It has been proven that slag and its individual fractions belong to the first class of radiation hazard and can be used in construction without restrictions. Zaporozhstal dump blast furnace slag is characterized by high hydraulic activity with an increase in absorption of calcium oxide CaO over time. Dump blast furnace slag can be recommended for production of binders (Portland cement and slag Portland cement) in terms of combination of chemical parameters: to moderately hazardous production wastes of the first class of radiation hazard with manifestation of high hydraulic activity.

Keywords: dump blast furnace slag, elemental composition, toxicity, hazard class of a substance, radioactivity, natural radionuclides, hydraulic activity.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-693-698

REFERENCES

1. Motz H., Geiseler J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management*. 2001, vol. 21, no. 3, pp. 285–293.

2. Khobotova E.B., Graivoronskaya I.V. Secondary use of metallurgical slags as sorbents in wastewater treatment. *Chernye metally*. 2019, no. 7, pp. 55–61. (In Russ.).
3. Tossavainen M., Engstrom F., Yang Q. etc. Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Waste Management*. 2007, vol. 27, no. 10, pp. 1335–1344.
4. Baricová D., Pribulová A., Futáš P. etc. Change of the chemical and mineralogical composition of the slag during oxygen blowing in the oxygen converter process. *Metals*. 2018, vol. 8, no. 10, pp. 844–857.
5. Ulubeyli G.C., Artir R. Sustainability for blast furnace slag: Use of some construction wastes. *World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship, Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015, vol. 195, pp. 2191–2198.
6. Ochoa Díaz R. Blast furnace dust and phosphorous slag, new materials for use in road engineering. *IOP Conference Series: Journal of Physics*. 2017, vol. 935, article 012003.
7. Pribulova A., Futas P., Petrik J., Pokusová M. Comparison of cupola furnace and blast furnace slags with respect to possibilities of their utilization. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018, vol. 63, no. 4, pp. 1865–1873.
8. Khobotova E.B., Kalmykova Yu.S. Environmental and chemical grounds for the utilization of blast furnace slag in the production of binders. *Russian Journal of General Chemistry*. 2012, vol. 82, no. 13, pp. 2180–2188.
9. Bobrova Z.M., Il'ina O.Yu., Khokhryakov A.V., Tseitlin E.M. Use of waste from mining and metallurgical industries for rational use of natural resources. *Izv. Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2015, vol. 40, no. 4, pp. 16–26. (In Russ.).
10. Kravchenko V.P. Assessment of hydraulic activity of blast-furnace slag. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2010, no. 20, pp. 44–47. (In Russ.).
11. Wang H., Cui S.P., Wang Y.L. Influence of cooling ways on the structure and hydraulic activity of blast furnace slag. *Key Engineering Materials*. 2015, vol. 633, pp. 234–239.
12. Wang H., Cui S.P., Wang Y.L. Influence of process conditions on the structure and hydraulic activity of air-cooling blast furnace slag. *Materials Science Forum*. 2015, vol. 814, pp. 476–482.
13. Chang P.-K., Lim Y. Effect of chemical composition on the latent hydraulic activity of blast furnace slag. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2000, vol. 37, no. 5, pp. 453–458.
14. Bougara A., Lynsdale C., Milestone N.B. Reactivity and performance of blastfurnace slags of differing origin. *Cement & Concrete composites*. 2010, vol. 32, no. 4, pp. 319–324.
15. Bellmann F., Stark J. Activation of blast furnace slag by a new method. *Cement and Concrete Research*. 2009, vol. 39, no. 8, pp. 644–650.
16. Kalmykova Yu.S., Khobotova E.B., Larin V.I. Rational ways of using dump blast furnace slag. *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*. 2016, no. 1, pp. 44–50. (In Russ.).
17. Molin F.D. *Characterization of radioactivity arising from the integrated steelworks in the UK and assessment of occupational exposure situations. A thesis submitted in fulfillment of the requirements of the University of Surrey for the degree of doctor of philosophy*, 2018, 281 p.
18. Ene A., Pantelica A. Characterization of metallurgical slags using low-level gamma-ray spectrometry and neutron activation analysis. *Romanian Journal of Physics*. 2011, vol. 56, no. 7-8, pp. 1011–1018.
19. Johnson W.J. The effect of chemical composition of blast-furnace slag on compressive strength and durability properties of mortar specimens. *Graduate theses and dissertation*, 2017, 83 p.
20. Kasina M., Michalik M. Iron metallurgy slags as a potential source of critical elements – Nb, Ta and REE. *Mineralogia*. 2016, vol. 47, no. 1-4, pp. 15–28.
21. Piatak N.M., Parsons M.B., Seal II R.R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*. 2015, vol. 57, pp. 236–266.
22. Sasmita C., Biswajit P., Manish K. Short-term leaching study of heavy metals from LD slag of important steel industries in Eastern India. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2017, vol. 19, no. 2, pp. 851–862.
23. Proctor D.M., Fehling K.A., Shay E.C. etc. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental Science and Technology*. 2000, vol. 34, no. 8, pp. 1576–1582.
24. Zak A., Isajenko K., Piotrowska B. etc. Natural radioactivity of wastes. *Nukleonika*. 2008, vol. 55, no. 3, pp. 387–391.
25. GOST 22688 – 77. *Izvest' stroitel' naya. Metody ispytaniy* [GOST 22688 – 77. Building lime. Test methods]. Moscow, 1977, 19 p. (In Russ.).
26. Khobotova E.B., Ignatenko M.I., Storchak O.G., Kalyuzhnaya Yu.S., Graivoronskaya I.V. Mineral composition of dump blast furnace slag. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 10, pp. 774–781. (In Russ.).
27. DSanPiN 2.2.7.029–99. *Gigienichni vimogi shchodo povodzhennya z promislivimi vidkhodami ta viznachennya ikh klasu nebezpeki dlya zdorov'ya naselennya* [DSanPiN 2.2.7.029 – 99. Hygienic requirements for industrial waste management of and determining their hazard class for public health]. Kiev, 1999, 21 p. (In Ukr.).
28. Khobotova E.B., Kalmykova Yu.S., Ignatenko M.I., Larin V.I. Natural radionuclides of blast furnace slags. *Chernye metally*. 2017, no. 1, pp. 23–28. (In Russ.).
29. *Normy radiatsionnoi bezopasnosti Ukrainy (NRBU-97) i osnovnye sanitarnye pravila raboty s radioaktivnymi veshchestvami i drugimi istochnikami ionizirovannykh izlucheni* [Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97) and basic sanitary rules for working with radioactive substances and other sources of ionized radiation]. Kiev, 1998, 159 p. (In Russ.).

Information about the authors:

E.B. Khobotova, Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Chair of Technology of Road Construction Materials and Chemistry (elinahobotova@gmail.com)
M.I. Ignatenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Technology of Road Construction Materials and Chemistry (m_ignatenko@ukr.net)
Yu.S. Kalyuzhnaya, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ecology (uskalmikova@gmail.com)
I.V. Graivoronskaya, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Metrology and Life Safety (inna_gra@ukr.net)
V.I. Larin, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Director of the Chemistry Research Institute (ndichem@karazin.ua)

Received January 20, 2020
 Revised June 23, 2020
 Accepted July 20, 2020