



Оригинальная статья

УДК 669.054.82

DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-192-199



БЕЗОТХОДНАЯ ПЕРЕРАБОТКА КОВШЕВОГО И ЭЛЕКТРОПЕЧНОГО ШЛАКА

О. Ю. Шешуков^{1,2}, Д. К. Егиазарьян^{1,2}, Д. А. Лобанов²

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

² Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Повторное использование техногенных отходов в черной металлургии может разрешить актуальную проблему комплексного применения имеющегося сырья ввиду истощаемости минеральных ресурсов. Металлургические шлаки перерабатываются не полностью, из-за чего их остатки складываются в отвалы предприятий и тем самым загрязняют окружающую среду. Эти остатки могут быть преобразованы в качественный промышленный продукт. Некоторые виды шлаков возможно эффективно перерабатывать совместно ввиду того, что, взаимодействуя между собой, части компонентов образуют новый продукт. В данной работе представлено исследование по совместной безотходной утилизации ковшевого и электропечного шлака черной металлургии, нацеленное на получение одновременно портландцементного клинкера и передельного чугуна. Приведено описание недостатков промышленных способов переработки данных шлаков, показана актуальность переработки ковшевого шлака. Представлены результаты математического моделирования жидкотекучести шлаков в зависимости от их состава, на основе которых проведены реальные исследования, приведена методика эксперимента. Определен химический состав шихты, позволяющий перерабатывать данные шлаки полностью, без какого-либо остатка, а также отходы обжига известняка при их наличии. В ходе такой переработки получаются передельный чугун и портландцементный клинкер качества, соответствующего ГОСТ. Также описаны результаты замеров вязкости разных составов шлака, дано описание полученных фаз шлака, представлен конечный температурный режим. Приводятся результаты опытно-промышленных испытаний разработанного способа утилизации, представлена цельная технологическая цепочка, предусматривающая использование роторно-наклонных печей.

Ключевые слова: ковшевой шлак, электропечной шлак, клинкер, чугун, химический состав, фазовый состав, техногенные образования

Финансирование: Работа проводилась по госзаданию ИМЕТ УрО РАН.

Для цитирования: Шешуков Ю.А., Егиазарьян Д.К., Лобанов Д.А. Безотходная переработка ковшевого и электропечного шлака // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 192–199. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199>

Original article

WASTELESS PROCESSING OF LADLE FURNACE AND ELECTRIC ARC FURNACE SLAG

O. Yu. Sheshukov^{1,2}, D. K. Egiazar'yan^{1,2}, D. A. Lobanov²

¹ Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

² Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

Abstract. The actual problem of mineral resources depletion in ferrous metallurgy can be effectively solved by complex reuse of technogenic waste. That waste is mostly presented by EAF (electric arc furnace) slag and LF (ladle furnace) slag. These two kinds of slag have no complex full utilization. The residues of slag are going to the dump and then the slag dump locations pollute the environment. However, the residues of EAF and LF slag can be transformed into the valuable industrial product by interaction of the slag components. This work presents the research for joint wasteless processing of EAF and LF slag with production of Portland clinker and cast iron. The article describes disadvantages of known methods of each slag processing; the paper also shows the significance of LF slag utilization. Design and calculations of the research are presented as well as its experiment methodology. The final results show five chemical compositions for the mixtures, which allow the complex processing of this slag without any waste left. Such processing provides the production of cast iron and Portland clinker both meeting requirements of normative documents. The paper also describes the results of viscosity measurements of slag compositions, the obtained slag phases, and presents the final temperature conditions. The work also considers the results of industrial tests for the developed processing technology and a complete technological chain involving the use of tilt rotary furnaces.

Keywords: ladle furnace slag, electric arc furnace slag, Portland clinker, cast iron, chemical composition, phase composition, technogenic formations

Funding: The work was performed according to the state assignment of the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Sheshukov O.Yu., Egiazar'yan D.K., Lobanov D.A. Wasteless processing of ladle furnace and electric arc furnace slag. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 192–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199>

ВВЕДЕНИЕ

В черной металлургии к техногенным образованиям в основном относят шлаки, составляющие 80 – 85 % общего количества твердых отходов. Это шлаки электросталеплавильного производства и ковшевой обработки стали. Площади, занятые шлаковыми отвалами, превышают 2,2 тыс. га. Такие площади, находясь в городской черте, около металлургических заводов, изменяют ландшафт, загрязняют земельные угодья, негативно в целом воздействуют на окружающую природную среду, тем самым ухудшая экологическую обстановку [1 – 3]. В то же время шлаки черной металлургии, преимущественно электропечные, содержат до 10 % металлического и около 30 % оксидного железа. Это означает, что такие шлаки могут быть эффективно переработаны и повторно использованы в виде качественного сырья для производственных нужд. Повторное использование позволяет разрешить актуальную проблему комплексного применения имеющегося сырья ввиду истощаемости минеральных ресурсов.

Окисленные конвертерные и электросталеплавильные шлаки имеют примерно следующий состав, %: 30 – 45 CaO; 15 – 20 SiO₂; 20 – 40 Fe_nO_m; 3 – 10 MgO; 3 – 5 Al₂O₃. Стоит отметить, что в таких шлаках содержится до 5 – 8 % металлического железа, представленного в виде корольков и мелких скрапин, а также до 3 – 4 % свободной не усвоившейся извести. Шлаки агрегатов ковш-печь (АКП) содержат, %: 55 – 60 CaO; 15 – 18 SiO₂; до 8 Al₂O₃; менее 1 FeO; до 10 MgO, а также незначительное количество фосфора.

В основном переработка электросталеплавильных шлаков направлена на то, чтобы извлечь металлическое и оксидное железо, при этом силикатная часть шлака направляется в отвал [4 – 7]. Существуют также работы, направленные на преобразование силикатной части электропечного шлака в материал для строительных работ, при этом часть силикатного и металлического остатка также направляется в отвал [8 – 13]. По опыту имеющихся работ можно сказать, что данный шлак можно преобразовать в качественный товарный продукт – сталь или компоненты для строительных работ [14 – 16].

Переработка ковшевого шлака чаще всего связана с его преобразованием в твердую фракцию путем стабилизации, поскольку он чаще всего представлен в виде пылевидной фракции, которую сложно переработать доступными средствами. Кроме того, мелкозернистый порошок относится к токсичным материалам. Его частицы легко аэрируются, распространяются на большие территории, растворяются в осадочных и грунтовых водах. При обработке таких шлаков на дробильно-сортировочных установках происходит значительное пылеобразование и ухудшение качества производимого щебня, что свидетельствует о невозможности переработки данных шлаков в твердом виде. Стабилизированная

фракция направляется на переработку в стройматериалы, при этом ее незначительная металлическая часть и остатки силикатной не перерабатываются полностью и направляются в отвал [17 – 20]. Однако из оставшихся компонентов можно образовать ценный промышленный продукт. Например, портландцементный клинкер и получить чугун из остатков оксида железа.

Анализ направляющихся в отвал компонентов шлаков показывает, что ковшевой и электропечной шлак могут быть эффективно совместно переработаны полностью с получением из них портландцементного клинкера и чугуна. Таким образом, цель данной работы связана с исследованием и разработкой технологии совместной переработки электропечного и ковшевого шлака. В ходе переработки должно получиться два товарных продукта – металлургический чугун и портландцементный клинкер, соответствующие требованиям ГОСТ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для того, чтобы получить портландцементный клинкер, нужно, чтобы в финальном продукте содержался алит (3CaO·SiO₂ или C₃S) в количестве от 50 до 70 % (по массе), белит (2CaO·SiO₂ или C₂S) в количестве от 15 до 30 % (по массе), 5 – 10 % (по массе) целита (3CaO·Al₂O₃ или C₃A) и столько же браунмиллерита (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ или C₄AF) [21]. Для того, чтобы восстановить железо из оксидов шлака, необходимо соблюсти восстановительные условия – высокотемпературный режим и наличие восстановителя.

Нагрев проводился до 1400 – 1600 °С, чтобы сформировать клинкер и восстановить железо. Ввиду того, что получить клинкер из шлаков является более сложной технологической задачей, исследование было начато с задачи по определению области и химических составов шихты, позволяющих получить шлаковый клинкер. С помощью шлаковых атласов и тройных диаграмм была определена первичная область *A – B – C*, охватывающая составы ковшевого и электропечного шлака, захватывающая при этом области существования алита, белита и целита (рис. 1).

Область *A – B – C* была разбита на 14 точек с шагом в 4,75 % (по массе) по содержанию CaO, SiO₂ и Al₂O₃ при постоянном содержании MgO (5 % (по массе)). На основании расчетов по полимерной модели строения шлаков [22] для каждой из точек определялась расчетная вязкость и количество свободной извести, влияющей на жидкотекучесть шлака. Расчетные данные показали оптимальные значения вязкости для области *A – B – C* (от 0,1 до 0,6 Па·с) и минимальные значения свободной извести (менее 10 % (по массе)). Следующим шагом стала проверка расчетных значений в лабораторных условиях.

В соответствии с планом проведения эксперимента, компоненты смеси дробились, смешивались до

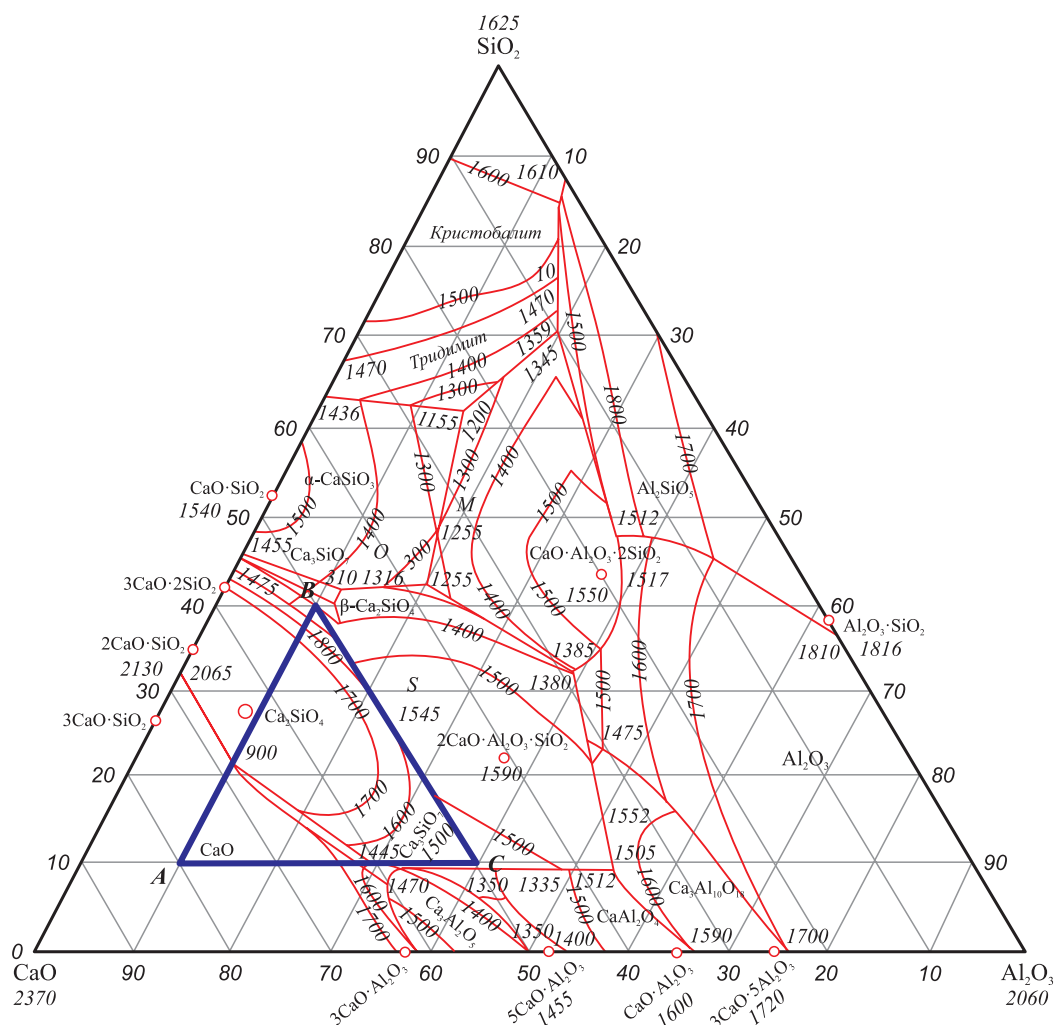


Рис. 1. Область диаграммы состояния тройной системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ по составам ковшевого и электропечного шлака

Fig. 1. Area of state diagram of ternary system $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, corresponding to the compositions of the ladle and electric furnace slag

однородной смеси, брикетировались и затем загружались в периклазографитовый тигель. Тигли со шлаком по одному помещались в высокотемпературную печь сопротивления. Образцы нагревались до полного расплавления при $1500-1600^\circ\text{C}$. Следом проводилось ступенчатое охлаждение с замером вязкости. Шаг охлаждения составлял $30-50$ град., скорость охлаждения – 5 град./мин, интервал выдержки каждой ступени – 10 мин. После проведения измерений тигли вынимали из печи и помещали в теплоизоляционный блок для медленного охлаждения. У охлажденных шлаков методом качественного рентгенофазового анализа определяли тип фаз, содержащихся в шлаке, а методом количественного рентгенофлуоресцентного анализа – количество данных фаз в шлаке.

Таким образом, на базе полученных результатов выявлена область существования фаз портландцементного клинкера. Далее установлена новая, более узкая область проведения эксперимента, для того, чтобы выявить конкретные области существования фаз клинкера. Всего проведено три серии опытов и получена финаль-

ная область проведения эксперимента (рис. 2). Точки на ней построены таким образом, чтобы охватить максимальную область существования алита (2, 5, 8, 11, 14) с учетом возможного отклонения в сторону большего содержания чистого CaO (1, 4, 7, 10, 13) или в сторону содержания C_2S (3, 6, 9, 12, 15) (см. рис. 2).

Также на этом этапе к смеси добавлялось боратное стекло, содержащее $8,88\%$ B_2O_3 от общей массы с целью коррекции стабилизации шлака. Борное стекло является дешевым отходом, требующим переработки [23]. Оно вводилось в смеси в количестве от $0,02$ до $2,4\%$ от общей массы составов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

В ходе первых серий опытов получено заключение о том, что образцы обладают оптимальной жидкоподвижностью от $0,1$ до $0,6$ Па·с при температурах $1540-1560^\circ\text{C}$ и 10 -мин выдержке образцов в при этих температурах. Со снижением температуры росла вязкость шлака, что негативно сказывалось на жидко-

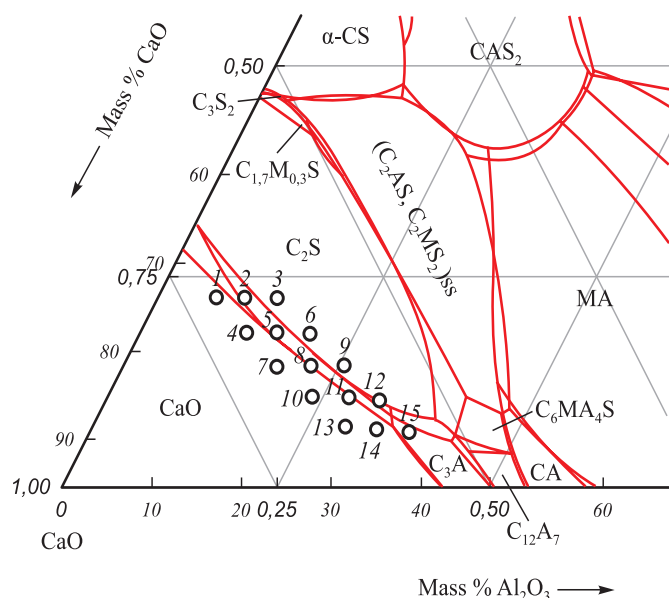


Рис. 2. Финальная область проведения эксперимента, нанесенная на диаграмму CaO–Al₂O₃–SiO₂ при 5 %-ном содержании MgO

Fig. 2. Final area of plotted experiment on the CaO–Al₂O₃–SiO₂ diagram at 5 % of MgO

подвижности. Кроме того, получен один образец кускового стабильного шлака (состав «А»), соответствующего по фазовому составу требованиям к клинкеру. Его химический состав, % (по массе): 66,5 CaO; 9,5 Al₂O₃;

19 SiO₂; 5 MgO. В ходе финальной серии опытов получено четыре образца шлака (5, 6, 8, 14), соответствующих составу клинкера. Как важный фактор при анализе результатов учитывалось, что в ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные. Технические условия» указано, что сумма β-C₂S фазы и фазы C₃S должна составлять более 67 % (табл. 1).

В табл. 2 приведены данные по полученной стабильности шлаков в финальной серии опытов. Оценка распада и стабильности шлаков проводилась визуально: оценивалось процентное количество рассыпавшейся и твердой фракции.

Последующим шагом стала проверка возможности получения чугуна и клинкера, соответствующих требованиям ГОСТ из реальных шлаков. Для этого был отобран состав имеющихся шлаков АКП и ДСП с ПАО «Северский трубный завод». В данных шлаках железо содержалось исключительно в виде оксида FeO. Шихта была подобрана в соответствии с образцами 5, 6, 8, 14 (табл. 1) и образцом «А» из первых серий опытов. Таким образом проведено пять плавок. Лабораторные эксперименты осуществлялись по представленной выше методике с соблюдением выявленного температурного режима. Для восстановления железа использовался кокс в качестве углеродистого восстановителя. С помощью программы HSC Chemistry 6.0 выявлено, что на 1 % FeO приходится 0,167 % углеродистого восстановителя, что было использовано при

Т а б л и ц а 1

Химический состав, вязкость и фазовый состав шлаков финальной серии опытов

Table 1. Phase and chemical composition, viscosity of slag samples in the final test series

Номер шлака	Состав смеси, % (по массе)					Вязкость, Па·с		Сумма C ₃ S и β-C ₂ S, %
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	боратное стекло	расчетная	измеренная	
1	67,01	5,25	19,29	5,00	3,69	0,088	0,105	59,18
2	63,69	9,10	19,96	5,00	2,40	0,115	1,703	56,25
3	60,28	12,90	20,45	5,00	1,46	0,139	0,101	67,74
4	65,64	11,01	16,59	5,00	1,89	0,138	0,117	59,27
5*	62,19	14,78	17,00	5,00	1,11	0,170	0,216	77,75
6*	58,68	18,51	17,27	5,00	0,59	0,198	0,265	67,11
7	64,08	16,65	13,50	5,00	0,82	0,218	0,189	48,66
8*	60,54	20,36	13,72	5,00	0,41	0,254	0,110	74,50
9	56,96	24,04	13,84	5,00	0,17	0,287	0,827	58,69
10	60,60	24,04	10,20	5,00	0,17	0,368	0,135	56,70
11	56,98	27,70	10,26	5,00	0,06	0,406	0,122	56,67
12	53,35	31,35	10,28	5,00	0,02	0,440	0,403	55,15
13	60,63	27,70	6,62	5,00	0,06	0,567	0,248	43,80
14*	56,99	31,35	6,64	5,00	0,02	0,603	0,469	74,45
15	53,35	34,99	6,64	5,00	0,02	0,634	0,862	64,22

* Составы, соответствующие портландцементному клинкеру.

Т а б л и ц а 2

**Визуальная стабильность шлаков
финальной серии опытов**

Table 2. Visual stability of slag samples in the final test series

Номер шлака	Распад, %	Стабильность, %
1	100	0
2	100	0
3	85	15
4	100	0
5*	0	100
6*	0	100
7	100	0
8*	0	100
9	85	15
10	85	15
11	85	15
12	0	100
13	100	0
14*	0	100
15	0	100
* Составы, соответствующие портландцементному клинкеру.		

шихтовании. Моделирование проводилось по расчету химической реакции восстановления железа с помощью углерода.

По итогам каждой из пяти плавов получен чугун, соответствующий требованиям ГОСТ 805 к передельному чугуно марки ПЛ1. Химический состав чугуна, % (по массе): 3,13 С; 1,26 Мн; 0,109 Si; 0,036 Р; 0,021 S.

Таким образом, на данном этапе имеется заключение о пяти шихтовых составах, из которых получается портландцементный клинкер и чугун при совместной высокотемпературной переработке (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

**Конечные составы шлаков для получения
клинкера и чугуна**

Table 3. Slags compositions for production of cast iron and clinker

Номер смеси	Состав смеси, % (по массе)				
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Боратное стекло
1	66,50	9,50	19,00	5,00	0,00
2	62,19	14,78	17,00	5,00	1,11
3	58,68	18,51	17,27	5,00	0,59
4	60,54	20,36	13,72	5,00	0,41
5	56,99	31,35	6,64	5,00	0,02

Полученные продукты соответствуют ГОСТ, все исходные материалы полностью перерабатываются в товарные продукты.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ

По результатам лабораторных работ предложена следующая последовательность операций для получения чугуна и клинкера на промышленном производстве:

- подготовка компонентов шихты к загрузке (сортировка, взвешивание, помол, перемешивание);
- загрузка шихты в дуговую печь;
- расплавление шихты при температуре 1540 – 1560 °С;
- выдержка расплава в течение 10 мин, слив и охлаждение расплава.

С целью отработки данной технологии проведены испытания на опытном производстве ПАО «Ключевской завод ферросплавов». Всего проведено три опытных плавки (табл. 4). Состав шихты для первой плавки соответствовал составу 1 из лабораторных опытов (табл. 3), составы для второй и третьей плавки представляли этот же состав, скорректированный на добавление окислы для большего восстановления чугуна.

Т а б л и ц а 4

Состав шихты для промышленных плавов

Table 4. Charge composition for industrial heats

Наименование компонента шихты	Содержание в шихте					
	% (по массе)			кг		
Номер плавки	1	2	3	1	2	3
Шлак ДСП	60,0	63,0	60	30,0	31,5	30
Шлак АКП	20,0	20,0	20	10,0	10	10
Известь (пыль циклонов)	20,0	17,0	20	10,0	8,5	10
Коксик (сверх 100 %)	10,0	3,5	19,2	5,0	1,75	9,6
Окалина (сверх 100 %)	–	3,0	50	–	1,5	50

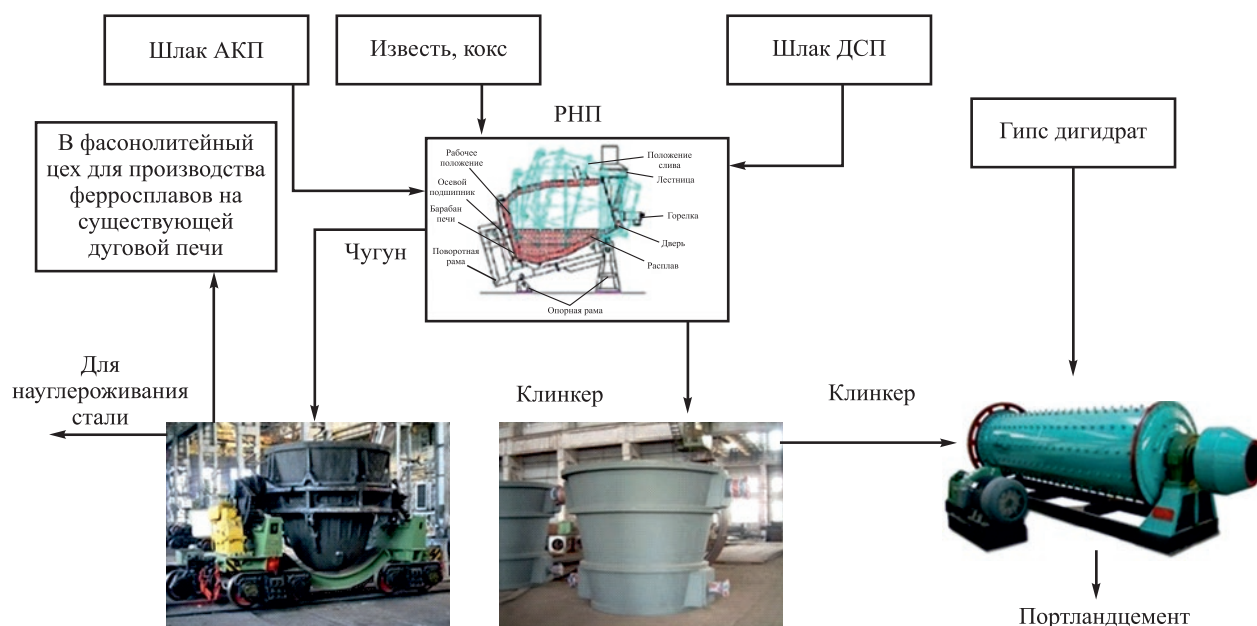


Рис. 3. Разработанная технологическая схема переработки шлаков АКП и ДСП с получением товарных продуктов

Fig. 3. Possible technological scheme for EAF and LF slag processing for industrial products manufacturing

Чугун плавов № 1 и 3 соответствовал требованиям ГОСТ 805 «Чугун переделный. Технические условия» к марке П1. Полученный в результате каждой из плавов клинкер с отличиями друг от друга до 0,001 % содержал 58 % $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 23 % $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и 19 % $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, что соответствует требованиям ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Данные результаты подтверждают возможность получения предлагаемым способом одновременно чугуна и портландцементного клинкера.

В результате плавки № 2 не получился чугун, удовлетворяющий требованиям ГОСТ вследствие того, что температура в дуговой печи превысила 1600 °С и произошло образование карбидов CaC_2 . В связи с этим для разработки технологической схемы переработки шлаков использовали роторно-наклонную печь, в которой не производится перегрев и она отличается более дешевой ценой по сравнению с дуговой печью.

Печь представляет собой цилиндрическую емкость, слегка наклоненную по горизонтали, которая медленно вращается по своей оси. Обрабатываемое вещество подается в верхний конец барабана. В то время как печь вращается, вещество плавно опускается в нижний конец и подвергается смешиванию и перемешиванию. Горячие газы проходят по печи, иногда в том же направлении, что и обрабатываемое вещество – параллельно, но обычно в противоположном направлении. Горячие газы могут появляться в выносной топе, либо образуются от внутреннего пламени в печи. Это пламя выходит из трубы форсунки – печной форсунки, которая работает как горелка Бунзена. Топливом для этого может быть газ, масло, размельченный нефтяной кокс или молотый уголь [24].

Разработанная схема переработки шлаковых отходов на роторно-наклонной печи (РНП) показана на рис. 3.

По данной технологии шлаки АКП и ДСП шихтуются в соответствии с полученными составами шихты для утилизации шлаков. После смешения смеси подаются в роторно-наклонную печь, где происходят процессы восстановления и плавления. После этого готовый металл (чугун) сливается в АКП для дальнейшей обработки, а полученный шлаковый остаток (клинкер) подается дальше на его доработку до портландцемента, где предварительно смешивается с гипсовым дигидратом.

Выводы

По итогам проведенной работы сделано заключение о том, что ковшевой и электропечной шлак действительно могут быть совместно переработаны без какого-либо остатка. В ходе лабораторных опытов получено пять химических составов шихты, которые позволяют полностью перерабатывать представленные шлаки. Лабораторные и промышленные испытания подтвердили возможность получения переделного чугуна и портландцементного клинкера путем переработки шлаков. При этом получаемый чугун и клинкер соответствуют качеству, требуемому по нормативным документам.

Разработана и представлена технологическая схема совместной переработки электропечного и ковшевого шлака с использованием роторно-наклонной печи, в ходе которой образуются товарные продукты и не остается непереработанного остатка. Предложенная технология позволяет реализовать полную утилизацию представленных видов шлаков, решая тем самым вопрос антропогенной нагрузки на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Демин Б.Л., Сорокин Ю.В., Зимин А.И. Техногенные образования из металлургических шлаков как объект комплексной переработки // *Сталь*. 2000. № 11. С. 99–102.
2. Смирнов Л.А., Сорокин Ю.В., Демин Б.Л. и др. Современные технологии и оборудование по переработке и использованию техногенных отходов металлургического производства // Труды Международного конгресса «Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов»: ТЕХНОГЕН-2017. Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 29–33.
3. Гудим Ю.А., Голубев А.А., Овчинников С.Г. Современные способы безотходной утилизации сталеплавильных шлаков // *Сталь*. 2009. № 7. С. 93–95.
4. Егiazарьян Д.К., Шаманов А.Н., Шешуков О.Ю. и др. Анализ рафинировочных свойств и вязкости шлаков внепечной обработки стали // Сборник трудов 72-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования». Магнитогорск. 2014. Т. 1. С. 180–185.
5. Уфимцев В.М., Коробейников Л.А. Шлаки в составе бетона: новые возможности // *Технологии бетонов*. 2014. № 6. С. 50–53.
6. Клачков А.А., Красильников В.О., Зуев М.В. и др. Передовые технологии эксплуатации футеровки электросталеплавильной печи на примере ДСП-135 ОАО «Северский трубный завод» // *Новые огнеупоры*. 2012. № 3. С. 99–104.
7. Аксенова В.В., Сафонов В.М. Исследование равновесия системы «шлак-металл» перед выпуском из ДСП-160 // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы 13-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 23–25 ноября 2016 г., Старый Оскол. Т. II. С. 15–18.
8. Song Q., Shen B., Zhou Z. Effect of blast furnace slag and steel slag on cement strength, pore structure and autoclave expansion // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 168–170. P. 17–20. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.17>
9. Skaf M., Manso M.J., Aragon A., Fuente-Alonso J.A., Ortega-López V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 120. P. 176–185. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
10. Abu-Eishah S., El-dieb A., Bedir M. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 34. P. 249–256. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012>
11. Tsakiridis P.E., Papadimitriou G.D., Tsivilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 152. No. 2. P. 805–811. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>
12. Santamaría A., Rojí E., Skaf M., Marcos I., Gonzalez J.J. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 106. P. 364–373. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.121>
13. Manso J.M., Gonzalez J., Polanco J. A. Electric arc furnace slag in concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004. Vol. 16. No. 6. P. 639–645. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(639\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(639))
14. Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Egiaryan D.K., Ovchinnikova L.A., Lobanov D.A. Chemical stabilization features of ladle furnace slag in ferrous metallurgy // *KnE Materials Science. TECHNOGEN-2017*. P. 59–64. <http://doi.org/10.18502/kms.v2i2.947>
15. Михеенков М.А., Шешуков О.Ю., Лобанов Д.А. Шлаковые техногенные образования как материал для получения силикатных товарных продуктов и чугуна // *Машиностроение*. 2018. Т. 6. № 1. С. 46–51.
16. Лобанов Д.А., Михеенков М.А., Шешуков О.Ю. и др. Особенности формирования шлаков черной металлургии и возможные пути улучшения технологии металлургического передела и комп-
1. Demin B.L., Sorokin Yu.V., Zimin A.I. Processing metallic-slag materials. *Steel in Translation*. 2000, vol. 30, no. 11, pp. 61–64.
2. Smirnov L.A., Sorokin Yu.V., Demin B.L., etc. Modern technologies and equipment for the processing and use of industrial wastes of metallurgical production. In: *Proc. of Int. Cong. "Fundamental Basics of Technologies for Technogenic Waste": TECHNOGEN-2017*. Yekaterinburg: UB RAS, 2017, pp. 29–33. (In Russ.).
3. Gudim Yu.A., Golubev A.A., Ovchinnikov S.G. Modern methods of wasteless steel slag utilization. *Stal'*. 2009, no. 9, pp. 93–95. (In Russ.).
4. Egiazar'yan D.K., Shamanov A.N., Sheshukov O.Yu., etc. Analysis of the refining properties and viscosity of ladle furnace slag. In: *Proc. of 72nd Int. Sci. Tech. Conf. "Actual Problems of Modern Science, Technics and Education"*. Magnitogorsk, 2014, vol. 1, pp. 180–185. (In Russ.).
5. Ufimtsev V.M., Korobeinikov L.A. Slags in concrete: new possibilities. *Tekhnologii betonov*. 2014, no. 6, pp. 50–53. (In Russ.).
6. Klachkov A.A., Krasil'nikov V.O., Zuev M.V., etc. Advanced technologies for EAF lining operation on the example of EAF-135 of "Seversky Pipe Plant" OJSC. *Novye огнеупоры*. 2012, no. 3, pp. 99–104. (In Russ.).
7. Akseanova V.V., Safonov V.M. Balance of slag-metal system before tapping from EAF-160. In: *Mater. of 13th Int. Russ. Sci.- Pract. Conf. "Modern Problems of Mining and Metallurgical Complex"*. Stary Oskol: 2016, vol. II, pp. 15–18. (In Russ.).
8. Song Q., Shen B., Zhou Z. Effect of blast furnace slag and steel slag on cement strength, pore structure and autoclave expansion. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 168–170, pp. 17–20. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.17>
9. Skaf M., Manso M.J., Aragon A., Fuente-Alonso J.A., Ortega-López V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017, vol. 120, pp. 176–185. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
10. Abu-Eishah S., El-dieb A., Bedir M. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*. 2012, vol. 34, pp. 249–256. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012>
11. Tsakiridis P.E., Papadimitriou G. D., Tsivilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 152, no. 2, pp. 805–811. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>
12. Santamaría A., Rojí E., Skaf M., Marcos I., Gonzalez J.J. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 106, pp. 364–373. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.121>
13. Manso J.M., Gonzalez J., Polanco J. A. Electric arc furnace slag in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004, vol. 16, no. 6, pp. 639–645. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(639\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(639))
14. Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Egiaryan D.K., Ovchinnikova L.A., Lobanov D.A. Chemical stabilization features of ladle furnace slag in ferrous metallurgy. *KnE Materials Science. TECHNOGEN-2017*, pp. 59–64. <http://doi.org/10.18502/kms.v2i2.947>
15. Mikheenkova M.A., Sheshukov O.Yu., Lobanov D.A. Slag technogenic formations as a material for the production of silicate products and pig iron. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*. 2018, vol. 6, no. 1, pp. 46–51. (In Russ.).
16. Lobanov D.A., Mikheenkova M.A., Sheshukov O.Yu., etc. Ferrous metallurgical slag formation and improving the technology of metallurgical treatment and slag complex processing. In: *XV Int. Congr.*

лексной переработки шлаков // XV Международный конгресс сталеплавильщиков. Сборник трудов к 100-летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380-летию российской металлургии. 2018. С. 462–467.

17. Pontikes Y., Jones P. T., Geysen D., Blanpain B. Options to prevent dicalcium silicate-driven disintegration of stainless steel slags // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2010. Vol. 55. No. 4. P. 1169–1172. <http://doi.org/10.2478/v10172-010-0020-6>
18. Shi C. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. No. 3. P. 459–462. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00707-4](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00707-4)
19. Skaf M., Ortega-López V., Fuente-Alonso J.A., Santamaria A., Manso J.M. Ladle furnace slag in asphalt mixes // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 122. P. 488–495. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.085>
20. Menad N., Kanari N., Save M. Recovery of high grade iron compounds from LD slag by enhanced magnetic separation techniques // *International Journal of Mineral Processing*. 2014. Vol. 126. P. 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.11.001>
21. Artioli G., Bullard J.W. Cement hydration: The role of adsorption and crystal growth // *Crystal Research and Technology*. 2013. Vol. 48. No. 10. P. 903–918. <http://doi.org/10.1002/crat.201200713>
22. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, В.И. Некрасов и др. Екатеринбург: УрФУ, 2017. 208 с.
23. Новиков В. К., Невидимов В.Н. Полимерная природа расплавленных шлаков. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 62 с.
24. Урал-олово. Роторная печь. Режим доступа: <https://ural-olovo.ru/projects/rotornaya-pech/rotornaya-pech/> (дата обращения: 14.12.2020).
17. Pontikes Y., Jones P. T., Geysen D., Blanpain B. Options to prevent dicalcium silicate-driven disintegration of stainless steel slags. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2010, vol. 55, no. 4, pp. 1169–1172. <http://doi.org/10.2478/v10172-010-0020-6>
18. Shi C. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cement and Concrete Research*. 2002, vol. 32, no. 3, pp. 459–462. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00707-4](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00707-4)
19. Skaf M., Ortega-López V., Fuente-Alonso J.A., Santamaria A., Manso J.M. Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 122, pp. 488–495. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.085>
20. Menad N., Kanari N., Save M. Recovery of high grade iron compounds from LD slag by enhanced magnetic separation techniques. *International Journal of Mineral Processing*. 2014, vol. 126, pp. 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.11.001>
21. Artioli G., Bullard J.W. Cement hydration: The role of adsorption and crystal growth. *Crystal Research and Technology*. 2013, vol. 48, no. 10, pp. 903–918. <http://doi.org/10.1002/crat.201200713>
22. Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Nekrasov I.V. *Refining Slag Utilization: Monograph*. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2017, 208 p. (In Russ.).
23. Novikov V.K., Nevidimov V.N. *Polymer Nature of Molten Slags*. Yekaterinburg: USTU-UPI: 2006, 62 p. (In Russ.).
24. *Ural-Tin. Rotary Furnace*. Available at URL: <https://ural-olovo.ru/projects/rotornaya-pech/rotornaya-pech/> (accessed: 14.12.2020). (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Юрьевич Шешуков, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов, Институт металлургии УрО РАН

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Денис Константинович Егизарьян, к.т.н., доцент кафедры металлургии железа и сплавов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, старший научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-9833-7191

E-mail: avari@mail.ru

Даниил Андреевич Лобанов, научный сотрудник Группы проблем техногенных отходов, Институт металлургии УрО РАН

E-mail: summerdanny@ya.com

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Chief Researcher of the Laboratory "Pyrometallurgy of Ferrous Metals", Institute of Metallurgy, UB RAS

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Denis K. Egiazar'yan, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys", Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Senior Researcher, Institute of Metallurgy, UB RAS

ORCID: 0000-0002-9833-7191

E-mail: avari@mail.ru

Daniil A. Lobanov, Research Associate of the Group of Technogenic Waste Problems, Institute of Metallurgy, UB RAS

E-mail: summerdanny@ya.com

Поступила в редакцию 04.12.2020

После доработки 10.02.2021

Принята к публикации 02.03.2021

Received 04.12.2020

Revised 10.02.2021

Accepted 02.03.2021