

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 669.18:669.054.82:543.68:669.9

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>Современное состояние переработки шлаков
сталеплавильного производстваБельский Сергей Сергеевич^{1✉}, Зайцева Анна Александровна²,
Тютрин Андрей Александрович³, Исмоилов Зулфикор Зафарович⁴,
Баранов Анатолий Никитич⁵, Сокольникова Юлия Владимировна⁶¹⁻⁶ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия⁶ Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия¹ bss@istu.edu² vo1odkinaa@yandex.ru,³ an.tu@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>⁴ chipa10@yandex.ru⁵ baranov@istu.edu⁶ jsokol1@yandex.ru

Резюме. Цель – на основе анализа существующих способов переработки шлаков сталеплавильного производства, включая десульфурацию и дефосфорацию шлаков, оценить свойства и состав шлаков сталеплавильного производства. Для изучения химического состава исследуемых образцов шлака применялись методы атомно-абсорбционного и оптико-эмиссионного анализов, для исследования микроструктуры – металлографический анализ. Изучены основные направления использования шлаков как в России, так и за рубежом. Показано, что основными направлениями утилизации шлаков сталеплавильного производства являются обезвреживание и обработка шлаков различными методами с последующим использованием в строительной и дорожной отраслях промышленности, а образующиеся фосфорсодержащие продукты – в сельском хозяйстве для замены суперфосфата. Также данные продукты можно использовать для снижения расхода извести и улучшения шлакообразования в сталеплавильном производстве. Выявлены факторы, сдерживающие многократное применение электросталеплавильного и конвертерного шлаков для рафинирования металла, среди которых основным является наличие в шлаках фосфора. По результатам проведенного анализа химического состава образцов шлака электросталеплавильного производства содержание железа составило 33,2% масс., кальция – 19,15% масс., фосфора – 0,33% масс., кремния – 5,39% масс. Железо находится в окисленной форме (FeO , Fe_2O_3 и Fe_3O_4), кремний и кальций присутствуют в виде двукальциевого силиката ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), фосфор представлен силикофосфатом кальция сложного состава – $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)_6(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)$. Фосфор поступает в плавильные агрегаты с минералами пустой породы, агломератом, рудой и флюсами. При повторном использовании шлаков фосфор возвращается обратно в металл, тем самым загрязняя конечный продукт. Возможными направлениями извлечения фосфора из шлаков сталеплавильного производства являются методы магнитной и электростатической сепарации, гравитационного и флотационного обогащения, а также гидрометаллургические методы переработки.

Ключевые слова: черная металлургия, шлак, сталеплавильное производство, десульфурация, дефосфорация

Для цитирования: Бельский С. С., Зайцева А. А., Тютрин А. А., Исмоилов З. З., Баранов А. Н., Сокольникова Ю. В. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 782–794. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>.

Original article

Current state of steelmaking slag processing

Sergey S. Belskii¹, Anna A. Zaitseva², Andrey A. Tyutrin³✉,
Zulfikor Z. Ismoilov⁴, Anatoly N. Baranov⁵, Yuliya V. Sokolnikova⁶

¹⁻⁶Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

⁶Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

¹bss@istu.edu

²vo1odkinaa@yandex.ru

³an.tu@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

⁴chipa10@yandex.ru

⁵baranov@istu.edu

⁶jsokol1@yandex.ru

Abstract. In the present work, the properties and composition of steelmaking slag are assessed by analysing existing processing methods, including desulfurisation and dephosphorisation. The atomic absorption and optical emission methods were used to study the chemical composition of slag samples, and metallographic analysis was used to study their microstructure. Major approaches to processing slags applied in Russia and abroad were studied. It was shown that steelmaking slags are neutralised and treated by various methods and subsequently applied in construction and road industries, while the obtained phosphorus-containing products are used in agriculture instead of superphosphate. In addition, these products reduce lime consumption and improve slag formation in steelmaking. The key factor hampering reusing electric steelmaking and converter slags for metal refining is shown to be the presence of phosphorus. The chemical composition of slag samples from the electric steelmaking production was analysed; the iron content amounted to 33.2 wt%, calcium – 19.15 wt%, phosphorus – 0.33 wt% and silicon – 5.39 wt%. Iron is present in the oxidised form (FeO, Fe₂O₃ and Fe₃O₄), silicon and calcium in the form of dicalcium silicate (2CaO · SiO₂), phosphorus in the form of calcium silicophosphate having complex composition – Ca₂(SiO₄)₆(Ca₃(PO₄)₂). Phosphorus is fed to the melting units with gangue minerals, agglomerate, ore and fluxes. When the slags are reused, phosphorus returns to the metal, thus contaminating the final product. Possible methods for extracting phosphorus from steelmaking slags include magnetic and electrostatic separation, gravity and flotation concentration, as well as hydrometallurgical processing.

Keywords: ferrous metallurgy, slag, steelmaking, desulfurization, dephosphorization

For citation: Belskii S. S., Zaitseva A. A., Tyutrin A. A., Ismoilov Z. Z., Baranov A. N., Sokolnikova Yu. V. Current state of steelmaking slag processing. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):782-794. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>.

ВВЕДЕНИЕ

Черная металлургия является одной из видов промышленности, обеспечивающей активное развитие ключевых отраслей мировой экономики, таких как тяжелая, транспортная и оборонная промышленность, все виды строительства и энергетики [1]. По итогам 2019 г. Российская Федерация входит в пятерку стран-лидеров производящих сталь. Объем производства стали российскими предприятиями составил 71,6 млн т⁸.

Деятельность предприятий черной металлургии оказывает значительное антропогенное влияние на окружающую среду – как

близлежащих городов, так и всей страны в целом. Принятие Россией Концепции устойчивого развития обязывает промышленные предприятия снижать экологическое влияние всеми доступными методами [2, 3]. При производстве стали и чугуна образуется значительное количество железосодержащих отходов, не подлежащих вторичному использованию ввиду высокого содержания в них фосфора. Поэтому наблюдается положительная тенденция роста количества исследований, направленных на поиск возможных решений и технологий переработки отходов металлургического производства. Именно

⁸Федаш А. В., Курошев И. С. Производство чугуна и стали // Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / под ред. Д. О. Скобелева. М., Спб.: Изд-во «Реноме», 2019. С. 257–304.

поэтому актуальной проблемой для современных предприятий является модернизация и разработка эколого-экономичных технологий утилизации шлаков и пыли производства стали [4].

Десульфурация и дефосфорация металла являются одними из направлений применения шлаков в твердом и жидком состояниях для рафинирования металла от примесей в качестве частичной замены кальцийсодержащих материалов, таких как известняк и плавиковый шпат. Применение жидких шлаков в сталеплавильном производстве играет важную роль в снижении энергетических потерь при производстве металла. Поэтому оценка процессов использования шлаковых расплавов сталеплавильного передела с позиций энерго- и ресурсосбережения является весьма актуальной [5, 6].

ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ШЛАКОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В зависимости от металлургического процесса и типа используемого оборудования можно выделить следующие виды шлаков черной металлургии: сталеплавильные (электроплавильные, конвертерные, мартенов-

ские); ферросплавные и ваграночные (рис. 1).

Наибольшим является выход доменных шлаков на 1 т чугуна, который составляет 0,6–0,7 т. При выплавке стали выход на 1 т продукции шлаков значительно меньше: при мартеновском способе – 0,2–0,3 т, бессемеровском и томасовском – 0,1–0,2 т; при выплавке стали в электропечах – 0,1–0,04 т.

В сталеплавильном производстве шлаковый режим является одним из основных определяющих факторов процесса, оказывающих влияние как на качество готовой стали, так и на долговечность футеровки и производительность печи. Шлаковый режим зависит от состава и свойства образующегося шлака, а также его количества. Шлакообразующие компоненты можно разделить на кислотные, основные и амфотерные оксиды. Одним из основных свойств шлака является его кислотность (основность), которая определяется в первую очередь соотношением оксидов кальция и кремния.

По химическому составу металлургические шлаки очень близки к портландцементу, поэтому они часто используются в строительстве, что позволяет расширить выпуск строительных материалов и снизить их стоимость.

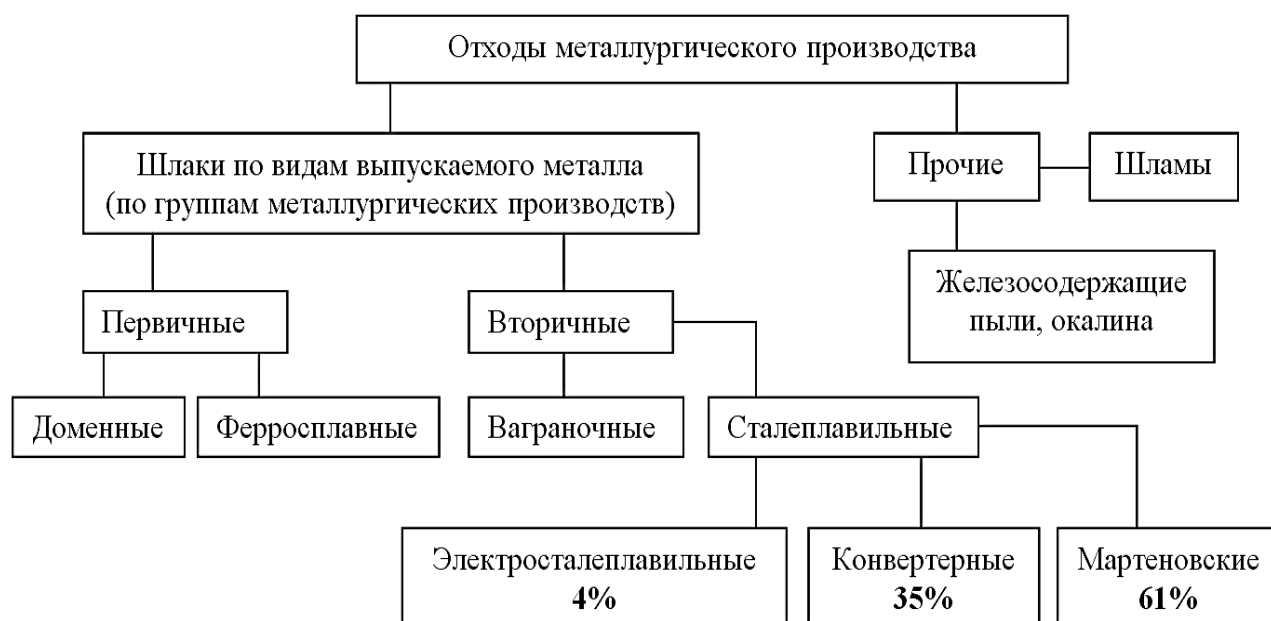


Рис. 1. Шлаки черной металлургии
Fig. 1. Ferrous metallurgy slags

В России ежегодно перерабатывается более 2,5 млн т сталеплавильных шлаков, из которых только около 1 млн т отправляют на повторную переработку с целью извлечения из них металла, примерно такое же количество используется в производстве щебня, около 330 тыс. т используют при производстве удобрений, и небольшое количество шлаков утилизируется в производстве шлаковаты [7–10].

Поскольку с каждым днем наблюдается дефицит доменных шлаков, вопросы переработки шлаков сталеплавильного производства приобретают все более существенное значение.

Существует большое количество предлагаемых способов жидкофазного восстановления шлаков сталеплавильного производства [11–19], в основе которых лежит восстановление присутствующих в шлаке оксидов углеродсодержащим восстановителем при температурах свыше 1400°C⁹.

Сотрудниками Южно-Уральского государственного университета [13] была изучена вероятность жидкофазного восстановления сталеплавильного шлака Златоустовского металлургического завода в печи индукционного нагрева. Средний состав такого шлака имеет следующий вид, % масс.: SiO₂ – 17,7–40,0; CaO – 21,9–47,4; MgO – 6,2–16,5; Al₂O₃ – 7,2–10,1; MnO – 1,2–5,3; Cr₂O₃ – 1,7–11,3; TiO₂ – 0,3–1,5; V₂O₅ – 0,1–0,3; FeO – 3,7–25,0 и NiO – 0,1–0,4. В шихту добавляли кокс в количестве 10% по массе шлака в качестве восстановителя. Полученный продукт содержал 3,5–4,5% масс. углерода, что соответствует легированному чугуна. При этом выход металлической части шлака составил 15–20% от магнитной фракции сталеплавильного шлака.

К полезным действиям шлаков можно отнести их рафинирующее действие для очистки стали от фосфора и серы, которые оказывают негативное воздействие на качество конечной продукции. Кроме того, шлаки спо-

собны защитить металл от окисления газами. Исходя из этого, к шлакам предъявляется ряд требований: шлаки должны обладать высокой рафинирующей способностью и низкой вязкостью, а также практически не оказывать влияния на материалы футеровки печи с точки зрения их совместного химического взаимодействия.

Для рафинирования чугуна известен способ применения синтетического шлака, получаемого из смеси содержащей 40–70% масс. извести; 10–15% масс. алюминиевого порошка; 10–25% масс. плавикового шпата; 10–20% масс. натриевой селитры. Такой способ рафинирования применялся на Алчевском металлургическом комбинате (Луганская обл.) и в ОАО «Тулачермет». Наибольший интерес представляла технология обработки чугуна на желобе доменной печи ОАО «Тулачермет». По данному способу формировали жидкоподвижный высокоосновной малоуглеродистый шлак, обладающий высокой способностью десульфурации [20].

Известен также способ десульфурации чугуна во вращающемся барабане непрерывного действия, который применялся на Енакиевском металлургическом заводе (Донецкая обл.) [21]. По данному способу проводили обработку чугуна шлаком на выпуске из доменной печи.

Также известен способ дефосфорации чугуна, который начали применять в Японии еще с 1983 г. По данному способу сначала производят окислительное рафинирование чугуна от кремния и фосфора, в качестве окислителя применяют кислород, который продувают через расплав, а в качестве флюсов – кусковую известь и сталеплавильный шлак. Далее производят десульфурацию металла порошкообразной кальцинированной содой, инжектируемой через специальную фурму, без удаления шлака.

В Австралии запатентован способ удаления кремния из чугуна с использованием жидких сталеплавильных шлаков, содержа-

⁹ А. с. № 964009, СССР, С22В7/04. Способ рафинирования металла синтетическим шлаком / К. М. Шакиров; заявитель и патентообладатель Сибирский металлургический институт им. Серго Орджоникидзе. Заявл. 31.03.1981; опубл. 07.10. 1982. Бюл. № 37.

щих оксиды железа, где шлаки сливали в промежуточную емкость вместе с жидким чугуном [22].

Известны также способы, по которым осуществляют внепечное рафинирование чугуна с помощью жидких шлаков, согласно которым осуществляется массоперенос компонентов через межфазную границу расплав-шлак. Однако такие способы так и не получили широкого применения в промышленности.

С целью переработки шлаков сталеплавильного производства их вовлекают в различные отрасли промышленности. Так, например, известны технологии, согласно которым из конвертерных шлаков получают абразивные материалы.

Изучена также возможность извлечения из шлака скрапа с использованием дробильно-сортировочных установок. Далее извлеченный скрап разделяют на магнитный и немагнитный, на негабаритный (более 10–15 т), габаритный (0,5–10,0 т) и мелкий (0,25–0,5 т). Отдельно складывается скрап, в котором заметны сплавленные скрапины разных плавок, а также скрапины с большой долей (более 20%) неотделяемого шлака.

Шлак сталеплавильного производства после извлечения скрапа используется в качестве:

- замены суперфосфата (фосфорсодержащие шлаки) в сельском хозяйстве;
- флюсов для ваграночного и аглодоменного производства;
- добавки, повышающей содержание марганца в стали (высокомарганцевые шлаки);
- добавки в сталеплавильном производстве для снижения расхода извести и улучшения шлакообразования;
- заменителя гранитного щебня при производстве бетона и железобетона.

Печной шлак, имеющий основность 1,5–2,0, можно легко переработать на шлаковом дворе в шлаковых ямах с получением фракционированного щебня путем его переработки на дробильно-сортировочной установке, однако для высокоосновного шлака внепеч-

ной обработки с основностью 2,5–4,0 необходимо применение иной технологии переработки, поскольку он имеет другие свойства. Содержащийся в высокоосновном шлаке $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ рассыпается в порошок вследствие полиморфизма кристаллической решетки. Такой шлак трудно перерабатывать и невозможно перевозить из-за пыления. Проблему переработки такого шлака можно решить несколькими способами¹⁰:

– слив шлака на дробленый известняк с получением декарбонизированной шлако-известковой смеси, которую можно использовать в цементной промышленности;

– введение в ковшевой шлак при внепечной обработке стали добавок, которые стабилизируют $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и предотвращают полиморфизм;

– использование ковшевого шлака в качестве частичной замены извести при формировании печного шлака, однако для этого потребуется стабилизация шлака и отработка технологий, которые позволят уменьшить его пылеунос.

Одним из направлений использования шлака является производство строительных материалов, однако на сегодняшний день в данной отрасли используется около 20–30% от всего объема образующегося шлака [24]. За счет высокой прочности и стойкости к выветриванию шлак используют в дорожном строительстве как альтернативу щебню [25, 26]. Электросталеплавильные шлаки также пригодны для использования в цементной промышленности [27–32].

Зарубежные страны с развитой металлургической промышленностью перерабатывают все доменные шлаки и значительную часть сталеплавильных шлаков [33, 34]. К теме утилизации вторичных ресурсов развитые страны относятся исключительно серьезно, в особенности европейские государства – члены Евросоюза [34]. За рубежом сталеплавильные шлаки применяются для известкования почв в сельском хозяйстве, в дорожном строительстве, а также как железосо-

¹⁰ ИТС 26–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство чугуна, стали и ферросплавов. М., 2017. 478 с.

держаний материал для вторичной переплавки в доменных печах.

В США, Англии, Франции, Венгрии шлаки перерабатывают в основном для производства щебня из воздушно-охлажденного шлака в траншеях непосредственно у доменных печей или за их пределами. Использование сталеплавильных шлаков в массовом масштабе началось еще с 1967 г. [34, 35].

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ШЛАКОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрим шлаки, образующиеся при производстве стали в ПАО «Северсталь» (рис. 2), которые представляют собой агломераты темно-серого цвета различной крупности до 300–400 мм. В образцах шлака присутствуют скопления металлического железа.

Для исследования элементного химического состава образцов шлаков выполнен химический анализ методами атомно-абсорбционного и оптико-эмиссионного анализа с помощью спектрометров «VARIAN AA 240», «VARIAN AA 240 FS» и «VARIAN 730-ES», а также методами рентгенофлуоресцентного анализа и атомно-эмиссионного с индуктивно связанной плазмой. По результа-

там проведенного анализа образцов шлака электросталеплавильного производства содержание компонентов составило, % масс.: Fe – 33,2; Ca – 19,15; P – 0,33; Si – 5,39; Mn – 4,68; Mg – 2,11; Al – 1,68; Ti – 0,38; Cr – 0,8; Cu – 0,0125.

Для исследования фазового состава образцов был проведен рентгеноструктурный анализ с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu, Япония) с вертикальным θ - θ гониометром. Перед проведением анализа металлическое железо было удалено из проб. Для идентификации фаз использовалась база порошковых дифрактограмм PDF-2. В результате получены данные о фазовом составе сталеплавильного шлака, % масс.: $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ – 45,52; FeO – 28,63; $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)_6(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)$ – 16,77; Fe_2O_3 – 7,88; Fe_3O_4 – 1,20. Как видно из результатов средней пробы, образцы шлака электросталеплавильного производства в основном состоят из силиката кальция $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, фосфор представлен силикофосфатом кальция сложного состава. Железо находится в окисленной форме – FeO, Fe_2O_3 и Fe_3O_4 – с соотношением от общей массы оксидов железа, %: 75,92:20,90:3,18.



Рис. 2. Срез образца электросталеплавильного шлака
Fig. 2. Section of a sample of electric steelmaking slag

Для изучения микроструктуры поверхности изучаемых образцов шлаков был проведен металлографический анализ с предварительной пробоподготовкой образцов, включающей отрезание, заливку смолой, выравнивание и полировку. В результате пробоподготовки были получены образцы шлака электросталеплавильного производства для металлографического анализа (рис. 3).

Для изучения микроструктуры поверхности изучаемых образцов шлаков был проведен металлографический анализ с предварительной пробоподготовкой образцов, включающей отрезание, заливку смолой, выравнивание и полировку. В результате пробоподготовки были получены образцы шлака электросталеплавильного производства для металлографического анализа (рис. 3).

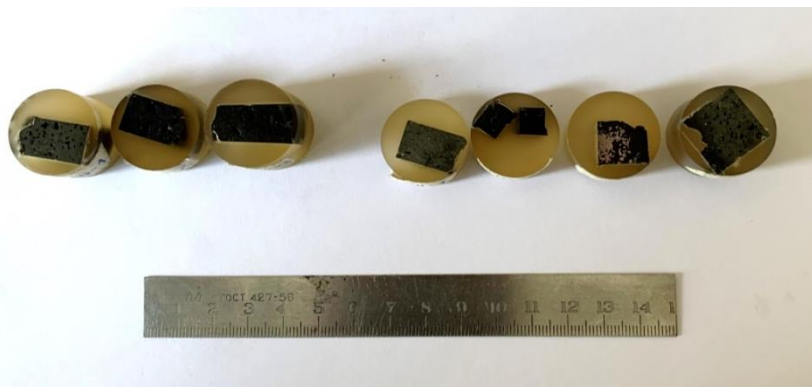


Рис. 3. Общий вид изучаемых образцов шлака после среза и полировки (заливка – акриловая смола марки Struers)
Fig. 3. General view of the studied slag samples after cutting and polishing (Struers acrylic resin is used as a filling)

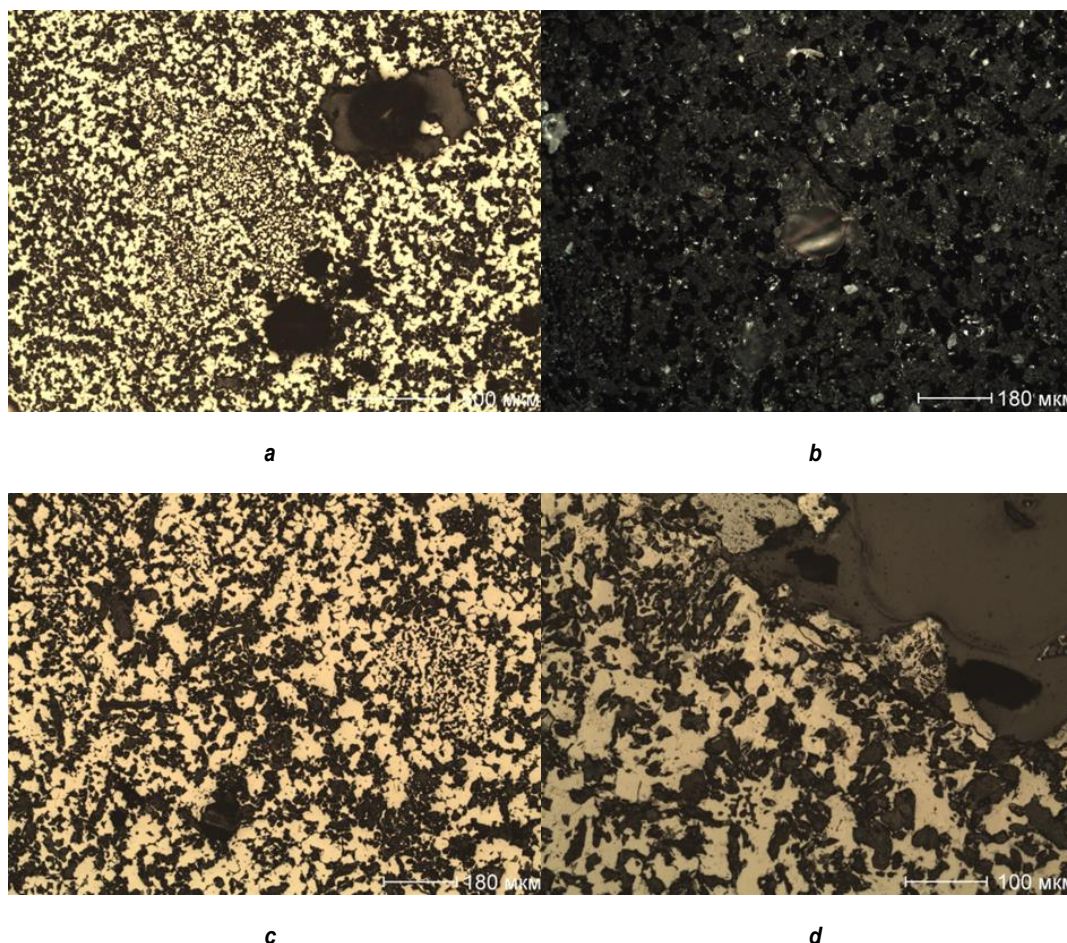


Рис. 4. Микроструктура поверхности шлака электросталеплавильного производства: а – светлое поле, увеличение 50х; б – темное поле, увеличение 100х; с – светлое поле, увеличение 100х; д – светлое поле, увеличение 200х
Fig. 4. Microstructure of electric steelmaking slag surface: а – light field; 50x magnification; б – dark field, 100x magnification; с – light field, 100x magnification; д – light field, 200x magnification

Микроструктура образцов исследовалась с помощью инвертированного металлографического микроскопа «Olympus GX-51» (Япония). Поверхность шлаков сталеплавильного производства имеет неоднородную мелкозернистую структуру (рис. 4). В образцах наблюдается наличие пор и металлического железа. Светлые области структуры характеризуются преимущественно наличи-

ем оксидов железа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) в присутствии незначительного количества Mn , Mg , Cr . Темные области обогащены силикатом кальция и, в меньшей степени, силикофосфатом кальция, о чем также свидетельствуют результаты рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе JIB-Z4500 (фирма JEOL, Япония) (рис. 5).

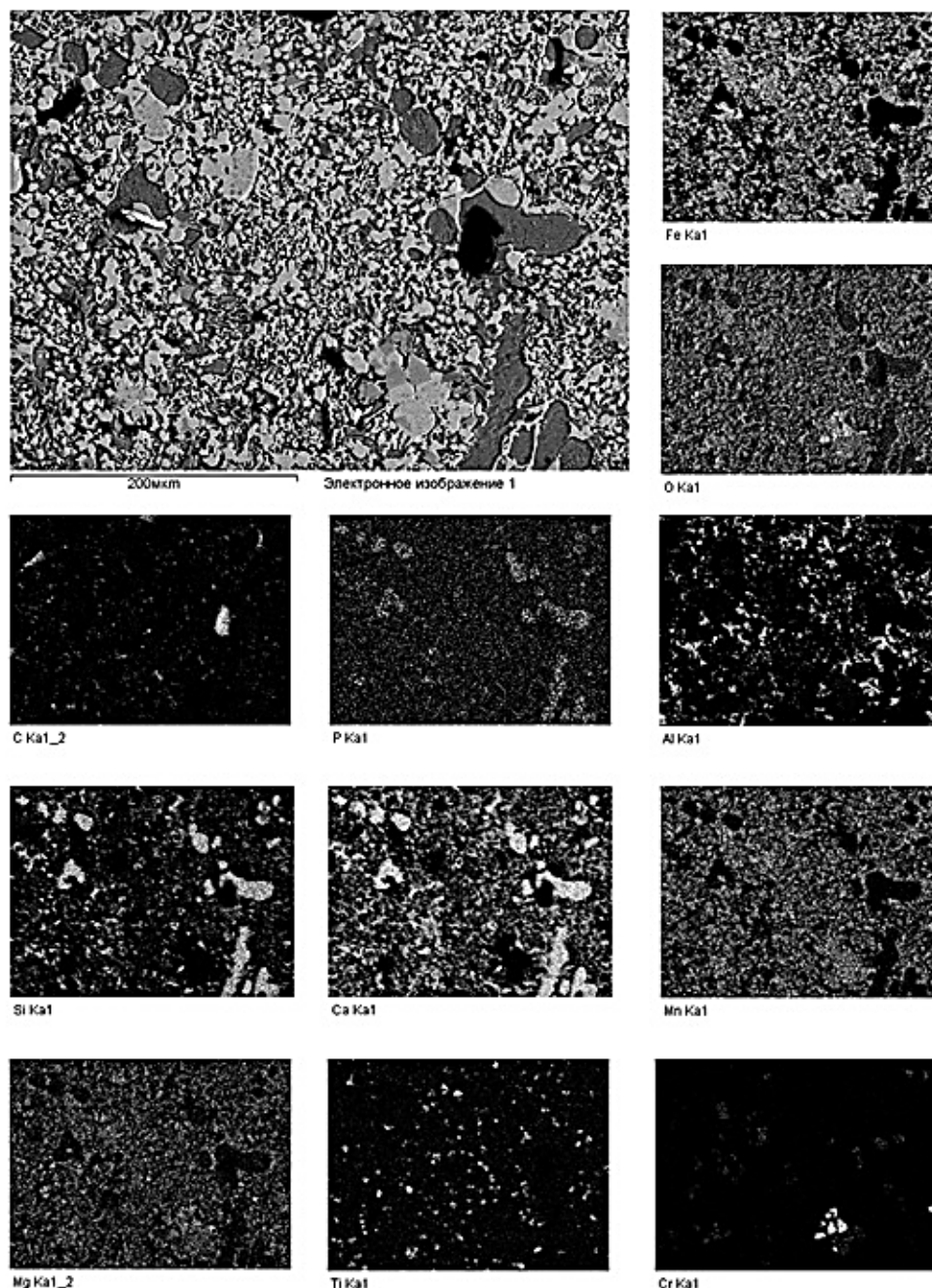


Рис. 5. Результаты рентгеноспектрального микроанализа образца электросталеплавильного шлака по элементам

Fig. 5. Results of X-ray spectral microanalysis of an electric steelmaking slag sample by elements

Одним из основных сдерживающих факторов многократного применения шлаков электросталеплавильного производства для рафинирования металла в качестве источника кальция является накопление фосфора в шлаках. Существуют различные методы извлечения фосфора из шлака: пиро- [18], гидрометаллургические [19, 36, 37] и с использованием физических способов разделения. Наибольший интерес для изучаемых технологий отходов сталеплавильной промышленности представляют физические и пирометаллургические способы разделения.

Основными недостатками существующих пирометаллургических методов извлечения фосфора являются высокие температура процессов и вязкость, а также низкая ликвидация шлака состава CaO-FeO-SiO_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного аналитического обзора можно выделить несколько основных направлений утилизации шлаков сталеплавильного производства: обезвреживание и обработка шлаков различными методами с последующим использованием в строительной и дорожной промышленности,

фосфорсодержащие продукты – в сельском хозяйстве для замены суперфосфата, для снижения расхода извести и улучшения шлакообразования в сталеплавильном производстве.

Одним из основных факторов, сдерживающих многократное применение электросталеплавильного и конвертерного шлаков для рафинирования металла, является накопление в шлаках фосфора, поступающего в печь с минералами, из которых состоит пустая порода, агломератом, рудой, а также с флюсами. При повторном использовании шлаков фосфор возвращается вновь в металл, тем самым загрязняя конечный продукт. Снижение его содержания в металле является важной задачей, поскольку годовые объемы образования шлаков конвертерного производства составляют 114,6–191,8 кг/т продукции, электросталеплавильного – 127–282 кг/т. Возможными направлениями извлечения фосфора из шлаков сталеплавильного производства являются методы магнитной и электростатической сепарации, гравитационного и флотационного обогащения, а также гидрометаллургические методы переработки.

Список источников

1. Shamsuddin M. *Steelmaking // Physical Chemistry of Metallurgical Processes, Second Edition. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer, 2021. P. 237–292. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58069-8_7*
2. Dildin A. N., Trofimov E. A., Chumanov I. V. Process improvement for liquidphase metal reduction from steelmaking dump slags // *Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9. Iss. 47. P. 132–141. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/109067>*
3. Glushakova O. V., Chernikova O. P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an environmental component of sustainable development of territories. Report 1 // *Steel in Translation. 2021. Vol. 51. P. 249–256. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040057>*
4. Tyushnyakov S. N., Selivanov E. N. Electromagnetic technology to utilize zinc-containing slags of copper-smelting production and dusts of blast furnace and steelmaking production // *Metallurgist. 2020. Vol. 64. P. 196–207. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00984-z>*
5. Mori K., Wada H., Pehlke R. D. Simultaneous desulfurization and dephosphorization reactions of molten iron by soda ash treatment // *Metallurgical Transactions B. 1985. Vol. 16. P. 303–312. <https://doi.org/10.1007/BF02679721>*
6. Yugov P. I., Sarychev A. V., Baeva L. A. Dephosphorization of metal during the conversion of low-manganese pig iron in an oxygen converter // *Metallurgist. 2001. Vol. 45. P. 379–381. <https://doi.org/10.1023/A:1017976123785>*
7. Шейченко М. С., Лесовик В. С., Алфимова Н. И. Композиционные вяжущие с использованием высокомагнезиальных отходов Ковдорского месторождения // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 1. С. 10–14.*
8. Лесовик В. С., Загороднюк Л. Х., Шахова Л. Д. Техногенные продукты в производстве сухих строительных смесей. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. 196 с.
9. Панфилов М. И., Школьник Я. Ш. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии. М.: Металлургия, 1987. 238 с.
10. Рояк С. М., Пьячев А. В., Школьник Я. Ш. Структура доменных шлаков и их активность // *Цемент. 1978. № 8. С. 4–5.*
11. Patent no. 9650688, United States of America. Method of recovering Fe from steel-making slag / II. Sohn, Sung Suk Jung; no. 14/228,815. Filed 28.03.2014; publ. 16.05.2017.
12. Сергеев Д. В., Чуманов В. И., Дильдин А. Н., Тро-

- фимов Е. А., Чуманов И. В. Пирометаллургическое восстановление компонентов шлака со шлаковых отвалов сталеплавильного производства // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16. Сателлитная конференция XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии (г. Волгоград, 16–20 мая 2016 г). Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2016. С. 345–347.
13. Shatokhin I. M., Kuz'min A. L., Smirnov L. A., Leont'ev L. I., Bigeev V. A., Manashev I. R. New method for processing metallurgical wastes // *Metallurgist*. 2017. Т. 61 No. 7-8. 523–528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.
14. Гимуранова Е. В., Омельчук А. А. Исследование процессов жидкофазного восстановления шлаков сталеплавильного производства в лабораторных условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 3. С. 139–150. <https://doi.org/10.15593/2223-9877/2017.3.08>.
15. Пат. № 2226220, Российская Федерация, С2, МПК C22B7/04. Способ переработки шлаков от производства стали / А. Эдлингер; заявитель и патентообладатель «Хольдербанк» Финансьер Глабус АГ. 2001101876/02. Заявл. 14.04.2000, опублик. 27.03.2004. Бюл. № 9.
16. Patent no. 9469885, United States of America, B2, C22B7/04. Method and apparatus for recovering valuable metals from slag and manufacturing multifunctional aggregate / Joonseong Ki, Jinill Hwang. Filed 29.03.2012; publ. 17.09.2013.
17. Patent no. 8211206, United States of America, B2, C22B7/04. Processing metallurgical slag / A. Mecchi. Filed 16.10.2008; publ. 03.07.2012.
18. Dosmukhamedov N., Egizekov M., Zholdasbay E., Kaplan V. Metal recovery from converter slags using a sulfiding agent // *JOM*. 2018. Vol. 70. P. 2400–2406. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3093-8>.
19. Cui Su Ping, Wang Xue Li, Wang Jian Feng, Liu Hui. Extraction of the RO Phase from Steel Slag // *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 898. P. 2470–2475. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.2470>.
20. Дюдкин Д. А., Кисиленко В. В. Производство стали // Внепечная обработка жидкого чугуна. Т. 2. М.: Изд-во «Теплотехник», 2008. 400 с.
21. Журавлев В. М., Югов П. И., Есипенко И. И. Новая технология десульфурации чугуна с многократным использованием вторичного металлургического сырья // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2000. № 1. С. 52–53.
22. Поживанов М. А. Внепечная металлургия чугуна. Киев: Изд-во ФТИМС НАНУ, 2006. 78 с.
23. Дильдин А. Н., Чуманов И. В., Чуманов В. И., Еремьев В. Е., Трофимов Е. А., Кирсанова А. А. Жидкофазное восстановление отходов сталеплавильного производства // *Металлург*. 2015. № 11. С. 34–38.
24. Шаповалов Н. А., Загороднюк Л. Х., Тикунова И. В., Шекина А. Ю. Рациональные пути использования сталеплавильных шлаков // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 1-2. С. 439–443.
25. Панковец А. И., Мироевский С. В. Утилизация электросталеплавильных шлаков // *Литье и металлургия*. 2013. № 1. С. 26–27.
26. Patent no. 6334885, United States of America, B1. Method of solidifying steel-making slag and material produced by the method / Y. Fukushima, H. Matsunaga, H. Tobo, M. Nakagawa, M. Takagi, M. Kumagai. 2002. Filed 13.10.1999; publ. 01.01.2002.
27. Хаматова А. Р., Хохлаков О. В. Электросталеплавильный шлак ОАО «Ижсталь» для цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 2. С. 221–227.
28. Tsakiridis P. E., Papadimitriou G. D., Tsvivilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 152. Iss. 2. P. 805–811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.
29. Patent no. 201610570916, China, XA. Mixed slag smelting reduction production and thermal refining method / Chzhan Wu. Filed 18.07.2016; publ. 04.05.2018.
30. Patent no. 6391086, United States of America, B1. Method for the use of electric steel plant slag for self-reducing agglomerates / M. Albuquerque Contrucci, E. S. Marcheze. Filed 20.03.2001; publ. 30.10.2002.
31. Patent no. 6033467, United States of America, A. Method of making cement or mine backfill from base metal smelter slag / D. Krofchak. Filed 8.05.1998; publ. 07.03.2000.
32. Patent no. 5944870, United States of America, A. Method of manufacturing pig iron or steel and cement clinker from slags / A. Edlinger. Filed 07.02.1995; publ. 07.02.2016.
33. Юнг В. Н. Технология вяжущих веществ. М.: Гос. изд-во лит-ры по строительным материалам, 1952. 560 с.
34. Ласкорин Б. Н. Проблемы развития безотходных производств. М.: Изд-во «Стройиздат», 1981. 207 с.
35. Лесовик В. С., Агеева М. С., Иванов А. В. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 29–32.
36. Patent no. 4225565, United States of America, A. Process for treating waste slags / K. Marukawa, S. Okamoto, K. Yamada, M. Iba. Filed 30.09.1980; publ. 25.01.1999.
37. Patent no. 3275848, Japan, A4. Method for recovering calcium-containing solid component from steelmaking slag and recovered solid component / Ya. Fukui, A. Asaba, S. Matsuo, M. Yamamoto. Filed 16.03.2016; publ. 17.10.2018.

References

1. Shamsuddin M. Steelmaking. In: *Physical Chemistry of Metallurgical Processes, Second Edition. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2021, p. 237-292. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58069-8_7.
2. Dildin A. N., Trofimov E. A., Chumanov I. V. Process improvement for liquidphase metal reduction from steelmaking dump slags. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016;9(47):132-141. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/109067>.
3. Glushakova O. V., Chernikova O. P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an environmental component of sustainable development of territories. Report 1. *Steel in Translation*. 2021;51:249-256. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040057>.
4. Tyushnyakov S. N., Selivanov E. N. Electromagnetic technology to utilize zinc-containing slags of copper-smelting production and dusts of blast furnace and steelmaking production. *Metallurgist*. 2020;64:196-207. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00984-z>.
5. Mori K., Wada H., Pehlke R. D. Simultaneous desulfurization and dephosphorization reactions of molten iron by soda ash treatment. *Metallurgical Transactions B*. 1985;16:303-312. <https://doi.org/10.1007/BF02679721>.
6. Yugov P. I., Sarychev A. V., Baeva L. A. Dephosphorization of metal during the conversion of low-manganese pig iron in an oxygen converter. *Metallurgist*. 2001;45:379-381. <https://doi.org/10.1023/A:1017976123785>.
7. Sheychenko M. S., Lesovik V. S., Alfimova N. I. Composite binders including high-magnesium waste from the Kovdorskoye deposit. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova*. 2011;1:10-14. (In Russ.).
8. Lesovik V. S., Zagorodnyuk L. H., Shahova L. D. *Technogenic products in manufacturing of dry building mixes*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; 2011, 196 p. (In Russ.).
9. Panfilov M. I., Shkolnik Ya. Sh. *Slag processing and waste-free technology in metallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1987, 238 p. (In Russ.).
10. Rojak S. M., Pyachev A. V., Shkol'nik Ya. Sh. Structure of blast furnace slags and their activity. *Tsement*. 1978;8:4-5. (In Russ.).
11. Sohn Il., Jung Sung Suk. *Method of recovering Fe from steel-making slag*. Patent US, no. 9650688; 2017.
12. Sergeev D. V., Chumanov V. I., Dil'din A. N., Trofimov E. A., Chumanov I. V. Pyrometallurgical recovery of slag components from steelmaking production slag dumps. In: *V Mezhdunarodnaya konferenciya-shkola po himicheskoy tekhnologii HT'16. Satellitnaya konferenciya HH Mendeleevskogo s'ezda po obshchej i prikladnoj himii = V International School-Conference on Chemical Technology ChT'16. Satellite conference of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. 16–20 May 2016, Volgograd. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2016, p. 345-347. (In Russ.).
13. Shatokhin I. M., Kuz'min A. L., Smirnov L. A., Leont'ev L. I., Bigeev V. A., Manashev I. R. New method for processing metallurgical wastes. *Metallurgist*. 2017;61(7-8):523-528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.
14. Gimuranova E. V., Omelchuk A. A. Investigation of liquid-phase reduction of steelmaking slag in the laboratory. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*. 2017;19(3):139-150. <https://doi.org/10.15593/2223-9877/2017.3.08>.
15. Edlinger A. *Processing method of steelmaking slags*. Patent RF, no. 2226220; 2004. (In Russ.).
16. Ki Joonseong, Hwang Jinill. *Method and apparatus for recovering valuable metals from slag and manufacturing multifunctional aggregate*. Patent US, no. 9469885; 2013.
17. Mecchi A. *Processing metallurgical slag*. Patent US, no. 8211206; 2012.
18. Dosmukhamedov N., Egizekov M., Zholdasbay E., Kaplan V. Metal recovery from converter slags using a sulfiding agent. *JOM*. 2018;70:2400-2406. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3093-8>.
19. Cui Su Ping, Wang Xue Li, Wang Jian Feng, Liu Hui. Extraction of the RO phase from steel slag. *Materials Science Forum*. 2017;898:2470-2475. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.2470>.
20. Dyudkin D. A., Kisilenko V. V. Steel production. *Ladle treatment of liquid cast iron*. Vol. 2. Moscow: Teplotekhnika; 2008, 400 p. (In Russ.).
21. Zhuravlev V. M., Yugov P. I., Esipenko I. I. New technology for cast iron desulfurization with repeated use of secondary metallurgical raw materials. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii = Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2000;1:52-53. (In Russ.).
22. Pozhivanov M. A. *Secondary metallurgy of cast iron*. Kiev: Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine; 2006, 78. (In Russ.).
23. Dil'din A. N., Chumanov I. V., Chumanov V. I., Eremyashev V. E., Trofimov E. A., Kirsanova A. A. Liquidphase recovery of steelmaking wastes. *Metallurg*. 2015;11:34-38. (In Russ.).
24. Shapovalov N. A., Zagorodnyuk L. H., Tikunova I. V., Shchekina A. Yu. Rational way to use steel slag. *Fundamental'niye issledovaniya = Fundamental Research*. 2013;1-2:439-443. (In Russ.).
25. Pankovets A. I., Miroevsky S. V. Utilization of electric steelmaking slags. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2013;1:26-27. (In Russ.).
26. Fukushima Y., Matsunaga H., Tobo H., Nakagawa M., Takagi M., Kumagai M. *Method of solidifying steel-making slag and material produced by the method*. Patent US, no. 6334885; 2002.
27. Khamatova A. R., Khohryakov O. V. The electro-steel-smelting slag JSC "Izhstal" for cements of low water demand and concrete on their basis. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta = News of the KSUATE*. 2016;2:221-227. (In Russ.).
28. Tsakiridis P. E., Papadimitriou G. D., Tsvilis S., Koro-

neos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;152(2):805-811.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.

29. Wu Chzhan. *Mixed slag smelting reduction production and thermal refining method*. Patent of China, no. 201610570916; 2018.

30. Albuquerque Contrucci M., Marcheze E. S. *Method for the use of electric steel plant slag for self-reducing agglomerates*. Patent US, no. 6391086; 2002.

31. Krofchak D. *Method of making cement or mine backfill from base metal smelter slag*. Patent of US, no. 6033467; 2000.

32. Edlinger A. *Method of manufacturing pig iron or steel and cement clinker from slags*. Patent US, no. 5944870; 2016.

33. Jung V. N. *Technology of binders*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'nym materialam; 1952, 560 p. (In Russ.).

34. Laskorin B. N. *Issues of waste-free production development*. Moscow: Stroybzdat; 1981, 207 p. (In Russ.).

35. Lesovik V. S., Ageev M. S., Ivanova A. V. Granulated slags in the production of composite binders. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova*. 2011;3:29-32. (In Russ.).

36. Marukawa K., Okamoto S., Yamada K., Iba M. *Process for treating waste slags*. Patent US, no. 4225565; 1999.

37. Fukui Ya., Asaba A., Matsuo S., Yamamoto M. *Method for recovering calcium-containing solid component from steelmaking slag and recovered solid component*. Patent Japan, no. 3275848; 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бельский Сергей Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Зайцева Анна Александровна,

ассистент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Тютрин Андрей Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Исмоилов Зулфикор Зафарович,

магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Баранов Анатолий Никитич,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey S. Belskii,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Anna A. Zaitseva,

Assistant Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Andrey A. Tyutrin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Zulfikor Z. Ismoilov,

Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Anatoly N. Baranov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Non-Ferrous Metals
Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Сокольникова Юлия Владимировна,
кандидат химических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
начальник химико-аналитической производственной
лаборатории,
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1/А, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.10.2021; одобрена после рецензирования 18.11.2021; принята к публикации 27.12.2021.

Yuliya V. Sokolnikova,
Cand. Sci. (Chem.),
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
Vinogradov Institute of Geochemistry of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences,
1/A, Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 13.10.2021; approved after reviewing 18.11.2021; accepted for publication 27.12.2021.