

Обезмеживание отвального шлака сульфидной медной плавки*

Лыкасов А.А., Рысс Г.М., Пономарев Д.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
ryssgm@susu.ru

Аннотация. Исследована возможность применения хлорирующего обжига для обезмеживания отвального медного шлака сульфидной медной плавки Карабашского медеплавильного комбината. В качестве хлоратора использовали хлорид кальция CaCl_2 . Установлено, что хлорирующий обжиг исходного шлака, состоящего, в основном, из фаялита $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, не привел к заметному удалению меди. Значительная степень обезмеживания (более 90 %) была достигнута в результате хлорирующего обжига предварительного окисленного шлака, в котором фаялит окислился с образованием смеси Fe_2O_3 и SiO_2 . Используя дробный факторный эксперимент 2^{3-1} , нашли зависимость степени обезмеживания предварительно окисленного шлака от температуры хлорирующего обжига, времени изотермической выдержки и содержания хлоратора в реакционной смеси. Установлено, что повышение температуры и содержания хлоратора приводят к увеличению степени обезмеживания, а влияние времени изотермической выдержки в исследованном интервале (2-4 ч) оказалось статистически незначимым.

Ключевые слова: шлак сульфидной медной плавки, обезмеживание, хлорирующий обжиг, окислительный обжиг, дробный факторный эксперимент, влияние температуры, влияние содержания хлоратора

ВВЕДЕНИЕ

Производство первичной меди сопровождается образованием большого количества отвальных шлаков на этапах выплавки штейна из концентратов, конвертирования штейна и рафинирования металла. Общее количество шлака составляет 2-4 т на тонну меди [1] (в среднем 2,2 т на тонну меди [2]).

В настоящее время в мире ежегодно образуется около 40 млн. т шлаков выплавки меди [3]. Шлаковые отвалы занимают значительные площади, а также являются причиной механического и химического загрязнения окружающей среды, главным образом, тяжелыми металлами. Отходы медеплавильных производств являются долговременным источником загрязнения природных вод, почв и растительности за счет самопроизвольного выщелачивания из них меди, цинка, свинца, мышьяка и других металлов водными растворами [4]. Утилизация таких шлаков позволит защитить окружающую среду и сберечь природные ресурсы.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Свойства шлаков медеплавильного производства позволяют использовать их для производства строительных материалов, абразивных материалов, стекла, кровельных

материалов, для осушения заболоченных участков, в дорожном строительстве и др. [2, 3, 5-8]. Однако, такое применение шлака приводит к потере входящих в его состав металлов.

В отвалах медеплавильных заводов Урала скопилось около 110 млн. т шлаков, в которых содержится 410 тыс. т меди, 2,56 млн. т цинка, 1,09 млн. т серы, 30,8 млн. т железа [9]. Отвальные шлаки уральских медеплавильных заводов содержат, в среднем, мас. %: 0,25-0,65 Cu; 0,35-4,63 Zn; 30,0-34,0 Fe [10]. Содержание цветных металлов и железа в шлаках медной плавки соизмеримо или превышает содержание элементов в рудах. Поэтому такие шлаки нельзя считать отвальными и их целесообразно перерабатывать с извлечением цветных металлов, железа и силикатной составляющей.

Извлечение железа из медеплавильного шлака достаточно просто можно осуществить восстановлением углеродом [11-14].

Сдерживающим фактором использования этого техногенного сырья является высокое содержание в нем меди. Сталь или чугун, полученные восстановлением железа из этого сырья, оказываются практически насыщенными медью и находят крайне ограниченное применение. В связи с этим, перспектива использования медеплавильного шлака в качестве сырья для черной металлургии связана с его предварительным обезмеживанием.

Распространенным способом выделения меди из шлака является флотация [10]. Флотации подвергают как шлаки из отвалов, так и вновь образующиеся.

На Урале флотацию отвальных шлаков ведут Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ), Кировоградский медеплавильный комбинат и комбинат "Карабаш-медь" [15].

В результате флотации получают медный концентрат и «технические пески». Хотя в результате флотации содержание меди в шлаке уменьшается, пески содержат слишком много меди для получения из них кондиционного железного концентрата. Кроме того, тонкоизмельченные пески оказывают отрицательное влияние на окружающую среду за счет выщелачивания из них тяжелых металлов [15, 16].

Результаты многочисленных исследований гидрометаллургических способов извлечения ценных компонентов из шлаков [2, 9, 16-19] не нашли применения в промышленности как из-за высокой стоимости и токсичности реагентов, так и из-за образования сточных вод, оказыва-

* Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.A03.21.0011. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции "Материаловедение и металлургические технологии" (RusMetalCon-2019), <https://rusmetalcon.susu.ru>

ющих более вредное воздействие на окружающую среду, чем шлаковые отвалы [19].

Перспективным способом выделения из шлаков цветных металлов является хлоридвозгонка, позволяющая добиться почти полного отделения цветных металлов от железа за одну операцию [20-22].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель настоящей работы – установить возможность обезмеживания гранулированного отвального шлака шахтной сульфидной плавки на заводе “Карабашмедь” с использованием хлорирующего обжига шлака. Количество такого шлака в отвалах составляет более 17 млн т. [23].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Образец шлака измельчали до фракции ~80 мкм и смешивали с CaCl_2 . Смесь распределяли тонким слоем в керамической лодочке и обжигали в атмосфере воздуха, не перемешивая. Температуру обжига, содержание хлоратора (CaCl_2) и время выдержки при заданной температуре задавали согласно плану эксперимента. Исходный шлак и продукты обжига анализировали на содержание меди с использованием оптического эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 2100 DV.

В предварительной серии опытов смесь шлака и хлоратора (CaCl_2) обжигали при температурах 900, 950 и 1000 °С. Содержание хлоратора варьировали в пределах 2-6 мас.% от навески шлака. Продолжительность обжига после нагрева шихты до нужной температуры варьировали от 2 до 4 ч.

После обжига количество меди в полученном продукте уменьшилось незначительно. В оптимальном варианте (1000 °С, 6 мас.% CaCl_2 , 4 ч изотермической выдержки) степень удаления меди не превысила 23 %. Таким образом, окислительно-хлорирующий обжиг шлака в указанных условиях оказался неэффективным.

Из опытов следовало, что наиболее значимым параметром процесса является температура. С повышением температуры содержание меди в обожженном шлаке снижается. Однако, повышение температуры ограничено плавлением шлака. По данным проведенного в работе термического анализа шлак начинает плавиться в интервале температур 1020-1085 °С.

Низкая эффективность обезмеживания шлака в выбранных условиях может быть вызвана либо низкой скоростью хлорирования меди, либо влиянием на процесс компонентов шлака. Если у некоторых из них, содержащихся в шлаке в значительных количествах, сродство к хлору велико, то поверхность хлоратора будет занята хлоридом этого элемента и возможность реагирования меди с хлоратором будет крайне ограничена.

Термодинамическая оценка возможности хлорирования элементов шлака в окислительной среде хлоридом кальция показала, что наиболее значимым партнером меди в этом процессе является двухвалентное железо. Согласно данным, приведенным в работе [24], железо, связанное в твердом шлаке с кремнеземом в фаялит $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, в процессе окислительного обжига шлака в результате диспропорционирования фаялита выделяется в самостоятельную фазу Fe_3O_4 , которая и взаимодействует с CaCl_2 с образованием хлорида железа FeCl_2 , ограничивая взаимодействие соединений меди с хлоратором. В этом

случае эффект обезмеживания шлака может быть достигнут в случае, если поверхность зерен шлака будет содержать только соединения трехвалентного железа, которые не взаимодействуют с CaCl_2 . Согласно исследованиям, проведенным в этой же работе, окисление железа на поверхности зерен шлака до Fe(III) может быть осуществлено обжигом шлака в атмосфере воздуха при температуре выше 800 °С. При этом поверхностный слой зерен окисленного шлака состоит, в основном, из Fe_2O_3 , образующегося в результате окисления Fe_3O_4 .

В основной серии опытов шлак размолотый шлак предварительно окислили на воздухе при температуре 900 °С в течение 6 ч. По данным микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализов поверхность зерен шлака была покрыта слоем Fe_2O_3 , толщина слоя, содержащего Fe(III) , составила 1-3 мкм. Содержание меди в шлаке после окислительного обжига составило 0,22 мас.%.

Опыты по хлорированию предварительно окисленного шлака проводили в условиях, практически идентичных описанным ранее. Температуру варьировали в пределах 950–1050 °С, содержание CaCl_2 изменяли от 2 до 6 мас.%, а время изотермической выдержки – от 2 до 4 часов. Образец шлака нагревали до заданной температуры в течение ~1,5 часов, а после опыта охлаждали до комнатной температуры вместе с печью. Для установления зависимости степени удаления меди из шлака от температуры, количества хлоратора (в мас.% от массы шлака) и времени изотермической выдержки при хлорирующем обжиге провели дробный факторный эксперимент 2^{3-1} [25, 26]. Значения факторов на основном уровне $X_{i,0}$ приняли равными 1000 °С, 4 мас.% и 3 ч, а интервалы варьирования ΔX_i – 50 °С, 2 мас.% и 1 ч, соответственно. Здесь и далее индексы 1, 2 и 3 относятся к температуре обжига, содержанию хлоратора и времени изотермической выдержки, соответственно.

В качестве параметров оптимизации приняли остаточное содержание меди в шлаке

$$y_1 = \text{мас.}\% \text{ Cu}_{\text{кон.}} \quad (1)$$

и степень обезмеживания шлака, %

$$y_2 = (\text{мас.}\% \text{ Cu}_{\text{исх.}} - \text{мас.}\% \text{ Cu}_{\text{кон.}}) \cdot 100 \text{ \%} / \text{мас.}\% \text{ Cu}_{\text{исх.}} \quad (2)$$

Здесь мас.% $\text{Cu}_{\text{исх.}}$ и мас.% $\text{Cu}_{\text{кон.}}$ – содержания меди в шлаке до и после хлорирующего обжига, соответственно.

Кодовые значения факторов связаны с натуральными значениями соотношением

$$x_i = (X_i - X_{i,0}) / \Delta X_i, \quad (3)$$

где X_i – значение фактора в натуральном масштабе.

Планы эксперимента в натуральном и кодовом масштабе и результаты опытов приведены в табл. 1. Каждый опыт повторяли дважды. На основном уровне (температура изотермической выдержки 1000 °С, содержание CaCl_2 в навеске 4 мас.% от массы шлака и время изотермической выдержки 3 часа) провели 3 опыта.

Из табл. 1 видно, что содержание меди в шлаке после хлорирования при условиях опыта 1 уменьшилось практически на порядок. Наибольшая степень обезмеживания шлака была достигнута при температуре обжига 1050 °С, содержании хлоратора CaCl_2 6 мас.% и времени изотермической выдержки 4 часа. С помощью микрорентгеноспектрального анализа медь была обнаружена в небольшом количестве только внутри зерен шлака.

Таблица 1

Планы эксперимента в натуральном и кодовом масштабе и результаты опытов

№	Натуральные значения факторов			Кодовые значения факторов			Остаточное содержание меди в шлаке, y_1 , мас.%	Степень обезмеживания y_2 , %
	температура T , °C	содержание $CaCl_2$, мас.%	время выдержки, ч	x_1	x_2	x_3		
1	1050	6	4	+	+	+	0,021	90,45
2	1050	2	2	+	-	-	0,053	75,9
3	950	6	2	-	+	-	0,050	77,27
4	950	2	4	-	-	+	0,086	60,91
5	1000	4	3	0	0	0	0,050	77,3

Зависимость содержания меди в шлаке от выбранных параметров процесса выражается следующим уравнением регрессии:

$$Y_1 = 0,053 - 0,017 x_1 - 0,016 x_2 + 0,001 x_3. \quad (4)$$

Среднеквадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии $S_1(b_i) = 0,003$, а доверительный интервал $\Delta_1(b_i) = \pm 0,01$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Зависимость степени обезмеживания от выбранных параметров процесса выражается уравнением регрессии:

$$Y_2 = 76,16 + 7,04 x_1 + 7,73 x_2 - 0,45 x_3. \quad (5)$$

Среднеквадратичная ошибка в определении коэффициентов этого уравнения регрессии $S_2(b_i) = 1,124$, а доверительный интервал $\Delta_2(b_i) = \pm 3,12$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Таким образом, в обоих случаях условие статистической значимости значений коэффициентов регрессии $|b_i| \geq \Delta(b_i)$ не выполняется только для коэффициента при x_3 , характеризующего влияние на процесс времени изотермической выдержки. После исключения статистически незначимых коэффициентов при x_3 получаем:

$$Y_1 = 0,053 - 0,017 x_1 - 0,016 x_2; \quad (6)$$

$$Y_2 = 76,2 + 7,0 x_1 + 7,7 x_2. \quad (7)$$

Температура и содержание хлоратора оказывают практически одинаковое влияние на обезмеживание шлака. Значительное влияние температуры окислительно-хлорирующего обжига на процесс обезмеживания шлака позволяет надеяться на повышение эффективности процесса при температуре выше 1050 °C. По данным проведенного термического анализа окисленный шлак полностью расплавился при температуре 1155 °C. Слабое влияние на процесс времени изотермической выдержки позволяет ограничить время изотермической выдержки при хлорирующем обжиге двумя часами.

Из приведенных данных следует, что скорость обезмеживания шлака определяется, по-видимому, диффузией меди через слой окалины к поверхности хлоратора. При этом увеличение реакционной поверхности с повышением содержания $CaCl_2$ в шлаке ускоряет процесс обезмеживания.

Выводы

Проведено обезмеживание отвального шлака сульфидной шахтной плавки Карабашского медеплавильного комбината окислительно-хлорирующим обжигом.

Установлено, что наиболее эффективен окислительно-хлорирующий обжиг после предварительного окисления шлака.

Показано, что степень обезмеживания шлака существенно зависит от температуры обжига и количества хлоратора. Наибольшее обезмеживание шлака достигнуто при содержании хлоратора $CaCl_2$ 6 мас. %, температуре обжига 1050 °C и времени изотермической выдержки 4 часа. Влияние времени изотермической выдержки в исследованном интервале оказалось статистически незначимым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Переработка шлаков медеплавильного производства / Е.М. Харченко, Г.А. Ульева, Т.Г. Егорова, С.С. Рахимбеков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 7-1. – С. 30-33.
2. Gorai Bipra. Characteristics and utilization of copper slag – a review / Bipra Gorai, R.K. Jana, Premchand // Resources Conservation and Recycling. – 2003. – vol. 39, is. 4. – P. 299-313. DOI: 10.1016/s0921-3449(02)00171-4
3. Prem P.R. Sustainable cleaner production of concrete with high volume copper slag / P.R. Prem, M. Verma, P.S Ambily // Journal of Cleaner Production. – 2018. – vol. 193, № 8. – P. 43-58. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.245
4. Использование отходов переработки отвальных шлаков для рекультивации нарушенных земель горнодобывающего комплекса / О.М. Гуман, И.А. Долинина, А.Б. Макаров, А.Г. Рудой // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2010. – № 4. – С. 43-49.
5. Кравцов А.В. Экологические предпосылки утилизации медеплавильного шлака в качестве активной минеральной добавки для бетонов / А.В. Кравцов, С.В. Цыбакин, С.И. Пронина // Технические науки – от теории к практике. – 2015. – № 43. – С. 47-52.
6. Капустин Ф.Л. Использование медеплавильного шлака в производстве цемента общестроительного назначения / Ф.Л. Капустин, М.А. Афанасьева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2013. – Т 13, № 2. – С. 51-55.
7. Afshoon I. Use of copper slag microparticles in self-consolidating concrete / I. Afshoon, Y. Sharifi // ACI Materials Journal. – 2017. – vol. 114, is. 5. – P. 691-699. DOI: 10.14359/51700887
8. Wu W. Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete / W Wu, W Zhang, G. Ma // Materials and Design. – 2010. – vol. 31, is. 6. – P. 2878-2883. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.12.037
9. Медеплавильные шлаки и вопросы утилизации минеральных отходов / Г.Г. Кориневская, В.А. Муфтахов, А.Л. Котельникова и др. // Минералогия техногенеза. – 2014. – № 15. – С. 244-250.
10. Санакулов К.С. Переработка шлаков медного производства / К.С. Санакулов, А.С. Хасанов. – Ташкент: Фан, 2007. – 198 с.
11. Потапов К.О. Селективное восстановление и пирометаллургическое извлечение железа из шламов медеплавильного производства / К.О. Потапов, В.Е. Рошин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2014. – Т. 14, № 3. – С. 25-29.

12. Лыкасов А.А. Восстановление железа из шлака сульфидной плавки продуктами газификации углерода / А.А. Лыкасов, Г.М. Рысс, И.С. Бородин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57, № 1. – С. 30-33. DOI: 10.17073/0368-0797-2014-1-30-33

13. Extraction of iron from copper-plant slag / A.A. Lykasov, G.M. Ryss, D.G. Sharafutdinov, A.Yu. Pogodin // Steel in Translation. – 2016. – vol. 46, is. 9. – P. 609-613. DOI: 10.3103/s0967091216090059

14. Recovery of iron from copper slag by deep reduction and magnetic beneficiation / K.-Q. Li., S. Ping., H.-Y. Wang, W. Ni // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2013. – vol. 20, is. 11. – P. 1035-1041. DOI: 10.1007/s12613-013-0831-3

15. Котельникова А.Л. Особенности вещественного состава и перспективы использования отходов вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков / А.Л. Котельникова, В.Ф. Рябинин // Литосфера. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 133-139.

16. Технология извлечения цинка, меди и утилизации песков из твердых отходов, полученных после флотации медеплавильных шлаков / Д.С. Реутов, А.Л. Котельникова, Б.Д. Халезов, Г.Г. Кориневская // Проблемы недропользования. – 2014. – № 1. – С. 121-126.

17. Rudnik E. Hydrometallurgical recovery of copper and cobalt from reduction-roasted copper converter slag / E. Rudnik, L. Burzynrska, W. Gumowska // Minerals Engineering . – 2009. – vol. 22, is. 1. – P. 88-95. DOI: 10.1016/j.mineng.2008.04.016

18. Ahmed I.M. Leaching and recovery of zinc and copper from brass slag by sulfuric acid / I.M. Ahmed, A.A. Nayl, J.A. Daoud // Journal of Saudi Chemical Society. – 2016. – vol. 20, is. 1. – P. S280-S285. DOI: 10.1016/j.jscs.2012.11.003

19. Фомченко Н.В. Выщелачивание цветных металлов из металлургических шлаков сернокислыми растворами

трехвалентного железа, полученными путем биоокисления / Н.В. Фомченко, А.А. Кайнова, М.И. Муравьев // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». – 2013. – Т. 4, № 1 (15). – С. 119-123.

20. Перспективное направление современной металлургии – хлорная металлургия / П.А. Ковган, М.Г. Абуов, А.К. Едильбаев, А.Н. Задиранов // Литье и металлургия. – 2009. – Т. 52, вып. 3. – С. 321-324.

21. Chlorination behaviors of copper phases by calcium chloride in high temperature oxidizing-chloridizing roasting / D-Q. Zhu, D. Chen, J. Pan et al. // TMS Annual Meeting. – 2012. – P. 429-437. DOI: 10.1002/9781118364987.ch52

22. Li L. Application of the chloridizing roasting method for the removal of copper and sulphur from copper slags / L. Li, J.-H. Hu, H. Wang // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2018. – vol. 127, is. 1. – P. 49-55. DOI: 10.1080/03719553.2017.1288357

23. Шадрунова И.В. Особенности технологических свойств гранулированных шлаков медной плавки Карабашского медеплавильного комбината / И.В. Шадрунова, Д.Н. Радченко, Г.А. Матюшенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 2. – С. 338-341.

24. Фазовые превращения при окислительном обжиге шлака сульфидной медной плавки / А.А. Лыкасов, А.Н. Матонин, И.Г. Вертий, А.А. Кимяшов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – № 15(274), вып. 18. – С. 97-99.

25. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.

26. Пашкеев И.Ю. Планирование физико-химического эксперимента и обработка его результатов / И.Ю. Пашкеев, Ю.С. Кузнецов. – Челябинск: ЧПИ, 1990. – 69 с.

DOI: 10.24892/RIJE/20200101

Removal of Copper from the Sulphide Copper Smelting Waste Slag

Lykasov A.A., Ryss G.M., Ponomarev D.A.
South Ural State University (National Research University)
Chelyabinsk, Russian Federation
ryssgm@susu.ru

Abstract. The applicability of chloridizing on roasting for removal of copper from the sulphide copper smelting waste slag of the Karabash copper-smelting plant is investigated. Calcium chloride CaCl_2 was used as chlorination agent. It is established that the chlorinating roasting of the initial slag presented by fayalite $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, hasn't led to noticeable removal of copper. Considerable degree of removal of copper (more than 90 %) has been reached as a result of the chlorinating of preliminary oxidized slag in which fayalite was oxidized to form Fe_2O_3 and SiO_2 . Using a fractional factorial experiment 2^{3-1} , dependence of degree of copper removal from preliminary oxidized slag upon temperature of the chlorinating roasting, time of isothermal roasting period and content of CaCl_2 was established. It is found that increase of temperature and of CaCl_2 content leads to increase in

degree of copper removal. The influence of time of isothermal roasting period in the studied interval (2–4 h) is statistically insignificant.

Keywords: slag of sulphide copper smelting, removal of copper, chloridizing roasting, oxidizing roasting, fractional factorial experiment, influence of temperature, influence of content of chlorinator.

REFERENCES

1. Kharchenko E.M., Ulieva G.A., Egorova T.G., Rakhimbekov S.S. The copper smelting slag recycling production [Pererabotka shlakov medeplavil'nogo proizvodstva],

Pererabotka shlakov medeplavil'nogo proizvodstva [International Journal of Applied and Basic Research], 2015, no. 7-1, pp. 30-33. (in Russ.)

2. Gorai Bipra, Jana R.K., Premchand Characteristics and utilization of copper slag – a review, *Resources Conservation and Recycling*, 2003, vol. 39, is. 4, pp. 299-313. DOI: 10.1016/s0921-3449(02)00171-4

3. Prem P.R., Verma M., Ambily P.S Sustainable cleaner production of concrete with high volume copper slag, *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 193, no. 8, pp. 43-58. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.245

4. Humane O.M., Dolinina I.A., Makarov A.B., Rudoy A.G. The use of waste processing waste slag for the restoration of disturbed lands of the mining complex [Ispol'zovanie otkhodov pererabotki otval'nykh shlakov dlya rekul'tivatsii narushennykh zemel' gornodobyvayushchego kompleksa], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal [News of higher educational institutions. Mountain Journal]*, 2010, no. 4, pp. 43-49. (in Russ.)

5. Kravtsov A.V., Tsybakin S.V., Pronina S.I. Environmental prerequisites of copper slag recycling as an active mineral admixture in concretes [Ekologicheskie predposylki utilizatsii medeplavil'nogo shlaka v kachestve aktivnoy mineral'noy dobavki dlya betonov], *Tekhnicheskije nauki – ot teorii k praktike [Engineering - from theory to practice]*, 2015, no. 43, pp. 47-52. (in Russ.)

6. Kapustin F.L., Afanasyev M.A. The use of copper slag in the production of cement of a general purpose [Ispol'zovanie medeplavil'nogo shlaka v proizvodstve tsementov obshchestvoit'nogo naznacheniya], *Vestnik YuUrGU. Seriya "Stroitel'stvo i arkhitektura" [Bulletin of SUSU. Series "Construction and Architecture"]*, 2013, vol.13, no. 2, pp. 51-55. (in Russ.)

7. Afshoon I., Sharifi Y. Use of copper slag microparticles in self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 2017, vol. 114, is. 5, pp. 691-699. DOI: 10.14359/51700887

8. Wu W., Zhang W., Ma G. Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete, *Materials and Design*, 2010, vol. 31, is. 6, pp. 2878-2883. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.12.037

9. Korinevskaya G.G., Muftakhov V.A., Kotelnikova A.L. et al. Copper smelting slag and issues of the disposal of mineral waste [Medeplavil'nye shlaki i voprosy utilizatsii mineral'nykh otkhodov], *Mineralogiya tekhnogeneza [Mineralogy of technogenesis]*, 2014, no. 15, pp. 244-250. (in Russ.)

10. Sanakulov K.S., Khasanov A.S. *Pererabotka shlakov mednogo proizvodstva* [Processing slag of copper production], Tashkent, Fan, 2007, 198 p. (in Russ.)

11. Potapov K.O., Roshchin V.E. Selective reduction and pyrometallurgical extraction of iron from copper production sludge, *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Metallurgiya" [Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"]*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 25-29. (in Russ.)

12. Lykasov A.A., Ryss G.M., Borodin I.S. Iron reduction from slag of sulphuric melting by the products of carbon gasification [Vosstanovlenie zheleza iz shlaka sul'fidnoy plavki produktami gazifikatsii ugleroda], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]*, 2014, vol. 57, no. 1, pp. 30-33. (in Russ.)

13. Lykasov A.A., Ryss G.M., Sharafutdinov D.G., Pogodin A.Yu. Extraction of iron from copper-plant slag, *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, is. 9, pp. 609-613. DOI: 10.3103/s0967091216090059

14. Li K.-Q., Ping S., Wang H.-Y., Ni W. Recovery of iron from copper slag by deep reduction and magnetic beneficiation, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 20, is. 11, pp. 1035-1041. DOI: 10.1007/s12613-013-0831-3

15. Kotelnikova A.L., Ryabinin V.F. The composition features and perspective of use for the copper slag recycling waste [Osobennosti veshchestvennogo sostava i perspektivy ispol'zovaniya otkhodov vtorichnoy pererabotki otval'nykh medeplavil'nykh shlakov], *Litosfera [Lithosphere]*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 133-139. (in Russ.)

16. Reutov D.S., Kotelnikova A.L., Khalezov B.D., Korinevskaya G.G. Studies and research technology to extract zinc, copper and utilization sands from solid waste obtained after flotation copper smelting slag [Tekhnologiya izvlecheniya tsinka, medi i utilizatsii peskov iz tverdykh otkhodov, poluchennykh posle flotatsii medeplavil'nykh shlakov], *Problemy nedropol'zovaniya [Problems of subsoil use]*, 2014, no. 1, pp. 121-126. (in Russ.)

17. Rudnik E., Burzynska L., Gumowska W. Hydrometallurgical recovery of copper and cobalt from reduction-roasted copper converter slag, *Minerals Engineering*, 2009, vol. 22, is. 1, pp. 88-95. DOI: 10.1016/j.mineng.2008.04.016

18. Ahmed I.M., Nayl A.A., Daoud J.A. Leaching and recovery of zinc and copper from brass slag by sulfuric acid, *Journal of Saudi Chemical Society*, 2016, vol. 20, is. 1, pp. S280-S285. DOI: 10.1016/j.jscs.2012.11.003

19. Fomchenko N.V., Kainova A.A., Muravyov M.I. Leaching of non-ferrous metals from metallurgical slag by sulfate solutions of ferric iron obtained by biooxidation [Vyshchelachivanie tsvetnykh metallov iz metallurgicheskikh shlakov sernokislymi rastvorami trekhvalentnogo zheleza, poluchennymi putem biookisleniya], *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta "MAMI" [Proceedings of the Moscow State Technical University "MAMI"]*, 2013, vol. 4, no. 1(15), pp. 119-123. (in Russ.)

20. Kovgan P.A., Abuov M.G., Edilbaev A.K., Zadiranov A.N. Perspective direction of modern metallurgy - chloride metallurgy [Perspektivnoe napravlenie sovremennoy metallurgii – khloronaya metallurgiya], *Lit'ye i metallurgiya [Casting and metallurgy]*, 2009, vol. 52, no. 3, pp. 321-324. (in Russ.)

21. Zhu D-Q., Chen D., Pan J. et al. Chlorination behaviors of copper phases by calcium chloride in high temperature oxidizing-chloridizing roasting, *TMS Annual Meeting*, 2012, pp. 429-437. DOI: 10.1002/9781118364987.ch52

22. Li L., Hu J.-H., Wang H. Application of the chloridizing roasting method for the removal of copper and sulphur from copper slags, *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2018, vol. 127, is. 1, pp. 49-55. DOI: 10.1080/03719553.2017.1288357

23. Shadrinova I.V., Radchenko D.N., Matyushenko G.A. Features of the technological properties of granulated slag of copper smelting of the Karabash smelter [Osobennosti tekhnologicheskikh svoystv granulirovannykh shlakov mednoy plavki Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata], *Gornyy in-*

formatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mountain Information and Analytical Bulletin], 2004, no. 2, pp. 338-341. (in Russ.)

24. Lykasov A.A., Matonin A.N., Vertiy I.G., Kimyashov A.A. Phase transformations during oxidizing roasting of copper sulphide smelting slag [Fazovye prevrashcheniya pri oksiditel'nom obzhige shlaka sul'fidnoy mednoy plavki], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Metallurgiya"* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"], 2012, no. 15 (274), is. 18, pp. 97-99. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Лыкасов А.А. Обезмеживание отвального шлака сульфидной медной плавки / А.А. Лыкасов, Г.М. Рысс, Д.А. Пономарев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2020. – Т.8, №1. – С. 3-8. DOI: 10.24892/RIJIE/20200101

25. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii* [Methods for optimizing an experiment in chemical technology], Moscow, Higher school, 1985, 327 p. (in Russ.)

26. Pashkeev I.Yu., Kuznetsov Yu.S. *Planirovanie fiziko-khimicheskogo eksperimenta i obrabotka ego rezul'tatov* [Planning a physicochemical experiment and processing its results], Chelyabinsk, ChPI, 1990, 69 p. (in Russ.)

Reference to article

Lykasov A.A., Ryss G.M., Ponomarev D.A. Removal of copper from the sulphide copper smelting waste slag, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2020, vol.8, no.1, pp. 3-8. DOI: 10.24892/RIJIE/20200101
