

УДК 669.054.8

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВЛЕННОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА С ТВЕРДОЙ ФАЗОЙ КРАСНОГО ШЛАМА*

Лебедев А.Б., аспирант кафедры металлургии (2799957@mail.ru)

*Утков В.А., д.т.н., профессор кафедры автоматизации технологических процессов
и производств (UtkovVA@yandex.ru)*

Гутема Е.М., аспирант кафедры металлургии (endaikem5@gmail.com)

Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ)

(199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2)

Аннотация. Гранулированный доменный шлак устойчиво используют в больших количествах при производстве цементов, в дорожном строительстве, сельском хозяйстве и в других областях техники и технологий. Особенностью процесса его получения является активное взаимодействие расплавленного металлургического шлака с охлаждающей жидкостью. Одновременно и мгновенно происходят затвердевание шлака, а также разрыв массы последнего в атмосфере острого пара на мелкие частицы из-за возникающих критических напряжений. Проблема состоит в том, что при грануляции шлаков, как правило, содержащих серу, в атмосферу выделяется большое количество вредных веществ (оксид серы и сероводород). Их концентрация на рабочих площадках участков грануляции многократно превышает ПДК. Для борьбы с этим явлением в состав охлаждающей жидкости вводят тонкодисперсные дорогостоящие известь или известняк. Это связано с большими затратами на сооружение дробильного, измельчительного и пылеочистного оборудования. К тому же размещение такого оборудования затруднено отсутствием в доменных цехах свободных площадей. В настоящей работе показано, что известь и известняк могут быть заменены тонкодисперсным красным шламом (КШ) – отходом производства глинозема из бокситов. Этот материал также обладает свойствами поглощения из газовой фазы соединений серы. Проблема его переработки является также актуальной задачей. В настоящее время КШ размещается в шламохранилищах, наносящих вред окружающей среде, а разрушение ограждающей дамбы приводит к экологической катастрофе (Венгрия, 2010 г.). В настоящей работе приведены результаты исследования использования КШ. В лабораторных условиях изучали сорбционные свойства КШ шести заводов. Исследовали образцы гранулированного шлака, полученные в процессе взаимодействия с КШ. Проведены лабораторные и промышленные испытания. Обнаружено, что с его помощью концентрация сернистых газов на рабочих площадках грануляции может быть уменьшена на два порядка. Важно, что новый гранулированный шлак, названный в рассматриваемом случае «шламошлаком», не уступает обычному по основным технологическим свойствам.

Ключевые слова: красный шлак, переработка, улучшение экологии, гранулированный шлак, шламошлак, технологические свойства, сокращение выбросов в атмосферу сернистых и парниковых газов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-276-282

ВВЕДЕНИЕ

Актуальнейшей современной задачей цветной металлургии является замена экологически опасного [1] складирования красного шлама (КШ), отхода производства глинозема из бокситов, его полной переработкой [2]. Производится поиск соответствующих промышленных вариантов [3 – 15]. Одним из них, как показала настоящая работа, является использование КШ при грануляции расплавленных шлаков с целью улучшения экологии производства. При грануляции этих шлаков происходит выделение в атмосферу сернистых газов [16, 17], создающих невыносимые условия труда на участках грануляции. Предотвращение этого явления также является весьма актуальной экологически важной задачей. Гранулированный шлак устойчиво используется в больших количествах при производстве цементов, в дорожном строительстве, сельском хозяйст-

* Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (регистрационный номер проекта 11.4098.2017/ПЧ от 01.01.2017).

ве и в других областях техники и технологий [18 – 22]. При активном взаимодействии расплавленного металлургического шлака с охлаждающей жидкостью одновременно и мгновенно происходят затвердевание шлака и разрыв массы последнего в атмосфере острого пара на мелкие частицы из-за возникающих критических напряжений. В атмосферу выделяются летучие оксиды серы и сероводород. Для борьбы с этим явлением в состав охлаждающей жидкости вводят тонкодисперсные известь или известняк, что связано с большими затратами. Поэтому в настоящее время, практически все рядовые компании занимаются поиском вариантов переработки КШ, чтобы исключить строительство многотоннажных накопителей КШ. Этой работой занимаются передовые научные коллективы России. В настоящей работе доказана способность красных шламов заменять указанные материалы [23 – 30]. Проведены лабораторные и промышленные испытания, которые показали, что концентрация сернистых газов на рабочих площадках грануляции может быть уменьшена на два порядка. Полученный шлак («шламошлак») не уступает обычно-

му гранулированному шлаку по основным технологическим свойствам.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель настоящих исследований – показать сорбционные свойства красного шлама на примере одиннадцати образцов, выявить оптимальную сорбционную емкость в зависимости от состава компонентов материала для улавливания серосодержащего газа, определить режимы, при которых процесс сорбции протекает с наибольшим показателем [1].

Для исследования сорбционных свойств выбрано одиннадцать образцов материала красного шлама, полученного в процессе различных технологий, на разных глиноземных предприятиях. Химический состав по основным компонентам весьма разнообразен, что дает возможность исследовать наиболее широко весь спектр этого материала [2]. Это позволит определить наиболее универсальный состав, с последующей доработкой технологии глиноземного производства, что сделает возможным массово использовать складированный отработанный материал в полезных для производства целях.

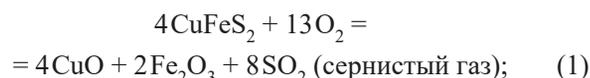
Для сравнения и определения наиболее оптимального состава сорбента предложены образцы шламов, байеровского (образцы 1 – 4 и 7), спекательного (образцы 5, 8 и 11) и байер-спекательного производств (6, 9, 10). Название образцов определяется по месту отгрузки: 1, 2 – НГЗ (Николаевский глиноземный завод); 3 – ЗАалК (Запорожский алюминиевый комбинат); с 4 по 6 – УАЗ (Уральский алюминиевый завод); с 7

по 9 – БАЗ (Богословский алюминиевый завод); 10 – ПАЗ (Павлодарский алюминиевый завод); 11 – БГЗ (Бокситогорский глиноземный завод).

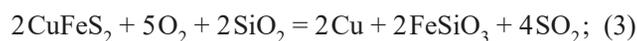
Для определения сорбционной способности красного шлама собрана установка (рис. 1). Конструкция установки состоит из следующих частей:

1 – печь для повышения температуры до 1000 °С и последующей выдержкой в течение 30 мин;

2 – навеска, содержащая медный колчедан для протекания следующих реакций



также возможно протекание реакции с участием соединения SiO_2 и образованием чистой меди:



при дальнейшем взаимодействии с кислородом воздуха протекает реакция (2);

полученный газ (сернистый ангидрид) посредством системы трубопроводов, имеющей соединительные муфты и запирающие вентили, поступает на следующую стадию очистки;

3 – емкость в качестве накопителя, имеющего мерную шкалу для точного определения объема газовой составляющей (при изменении уровня воды накапливает или наоборот избавляется от исследуемой порции вещества);

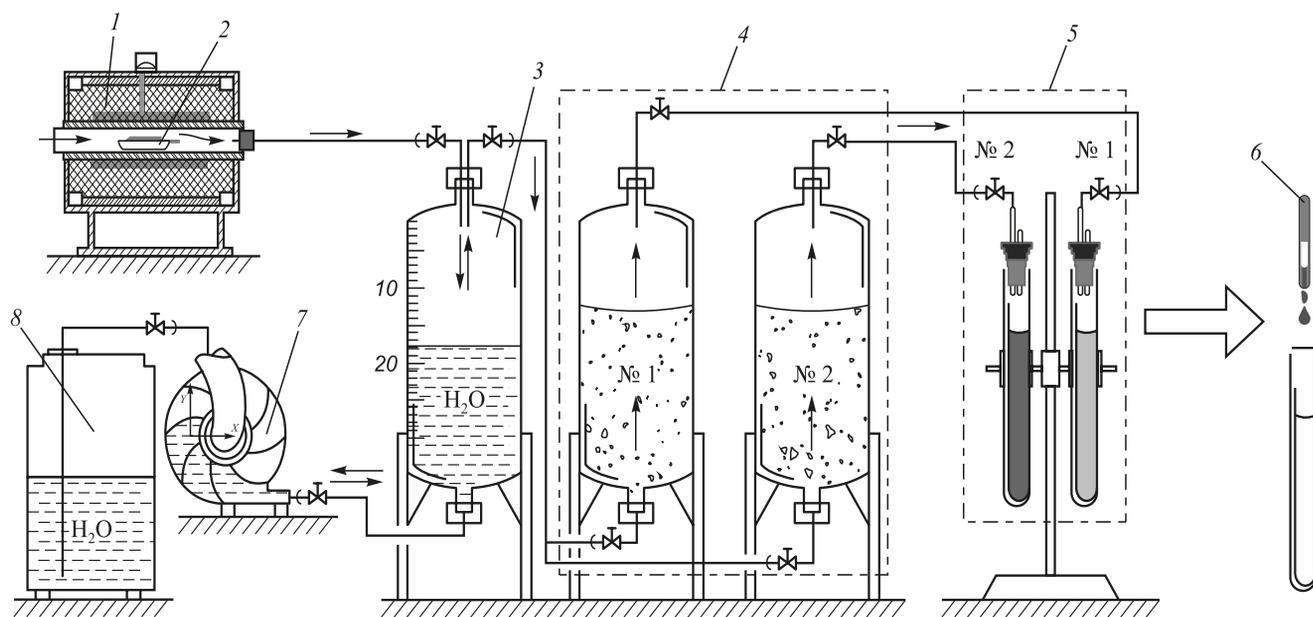


Рис. 1. Установка для анализа степени очистки серосодержащих газов:

1 – печь; 2 – навеска пробы; 3 – накопитель; 4 – фильтры; 5 – проба после очистки; 6 – анализ; 7 – насос; 8 – емкость с водой

Fig. 1. Installation for analysis of purification degree of sulfur-containing gases:

1 – furnace; 2 – sample weight; 3 – storage; 4 – filters; 5 – sample after cleaning; 6 – analysis; 7 – pump; 8 – water tank

серный ангидрид поступает в проходной сосуд в одностороннем порядке, где происходит накапливание загрязненного воздуха с фиксированной концентрацией серосодержащих соединений;

4 – две емкости для забора газовой составляющей; функциональное разделение на максимально возможную очистку, которая выполняется в емкости с наилучшим сорбентом, содержащим один из образцов (красный шлак), и на очистку, которая выполняется в соседней емкости, для последующего сравнения с другими образцами;

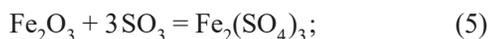
5 – отбор в специальные емкости и последующее сравнение степени очистки проб;

6 – инструмент для дозирования раствора (стандарт – титр йода $C(1/2I_2) = 0,1$ моль/дм³) в исследуемый объем газа с последующим определением степени насыщенности серой;

7 – насос создает парциальное разрежение в накопителе при откачивании воды из емкости, что способствует понижению уровня жидкости в проходном сосуде; при повышении уровня воды исследуемый газ парциальным давлением вытесняется на следующую стадию технологии очистки;

8 – остатки откаченной жидкости поступают в резервный сосуд и остаются там до востребования.

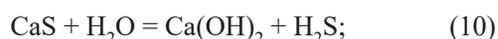
При взаимодействии серного ангидрида с красным шламом протекают следующие реакции с образованием сульфатных соединений [3]:



Проведенные предварительные испытания дали основание полагать, что при прохождении загрязненных газов через объем, наполненный материалом

красного шлама, значительная часть серосодержащих соединений остается адсорбированной. Результаты анализа сравнения фильтрованной и не фильтрованной проб, показали разницу до 91 – 95 %, что является неоспоримым основанием применять исследуемый материал в качестве сорбента.

В процессе грануляции происходит выделение газов при взаимодействии с водой сульфидов металлов, что становится следствием образования пор в расплавленном шлаке. Протекают следующие химические реакции:



На втором этапе образуется сернистый газ по следующей реакции:



Как видно из реакции (12), вода, помимо участия в реакции газообразования, исполняет роль охлаждающего агента, повышает вязкость шлака и его способность удерживать газы. Поэтому для правильной организации процесса необходим хороший контакт воды со шлаком [2]. Однако при таком быстром охлаждении происходит процесс сжатия, который вызывает внутренние напряжения, в результате чего при достижении критического значения происходит взрывание частиц гранулированного шлака, и серосодержащие газы удаляются из объема материала (рис. 2).

Для решения проблемы улавливания сернистых соединений предложено в технологический цикл грануляции шлака добавлять предварительно подготовленный красный шлак. В бассейн с водой, который содержит

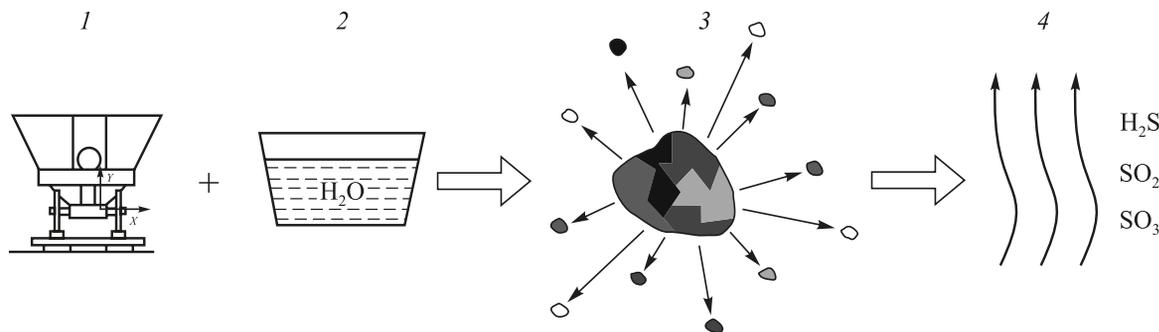


Рис. 2. Образование газообразных серосодержащих выделений в ходе процесса грануляции шлака: 1 – шлак; 2 – бассейн с водой; 3 – грануляция; 4 – выделение серосодержащих соединений

Fig. 2. Generation of gaseous sulfur-containing emissions during the slag granulation process: 1 – slag; 2 – pool with water; 3 – granulation; 4 – sulfur-containing compounds emission

специальные добавки, сливается расплавленный шлак. В результате этого процесса наблюдается улавливание значительной части сероводорода и сернистых газов [4].

Структура гранулированного шлака (рис. 3) после предварительной обработки имеет пористость, которая способствует улавливанию газов. Причина улавливания серосодержащих соединений объясняется процессом адсорбции. Адсорбат шлака в основном скапливается в порах, размер которых соизмерим размеру сорбируемого вещества. Выделившиеся газы в момент соприкосновения шлака с водой несут в себе положительно заряженные частицы, при взаимодействии с красным шламом происходит притягивание и осаждении на поверхности пористой структуры серосодержащих веществ. Таким образом, насыщение сорбента происходит посредством межпористого пространства, от которого зависит общая сорбционная емкость материала [5].

Отрицательно заряженные частицы сорбата также осаждаются на поверхности, примыкая к ранее притянутым частицам, и образуют диффузионный слой. Следствием взаимодействия этих материалов является практически полное исключение серосодержащих выбросов в атмосферу рабочего пространства. Химический состав доменного шлака следующий: 39,38 % SiO_2 ; 1,42 % S; 4,80 % MgO ; 6,10 % Al_2O_3 ; 0,28 % MnO ; 47,68 % CaO ; 1,02 % FeO ; 0,50 % K_2O ; 0,60 % Na_2O .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Материал (шламошлак), содержащий в своем объеме в связанном состоянии сероводород и сернистые

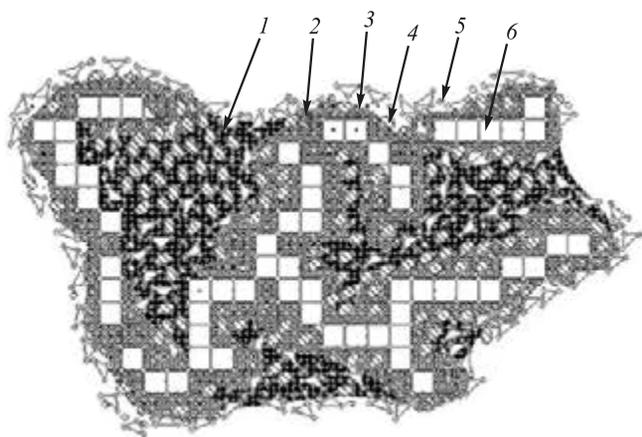


Рис. 3. Схема структуры частиц гранулированного шлака: 1 – пористость; 2 и 3 – адсорбционный и диффузионный слой; 4 и 5 – положительно и отрицательно заряженные частицы в диффузионном слое; 6 – кристаллическая решетка, состоящая из CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O и др.

Fig. 3. Diagram of structure of granulated slag particles: 1 – porosity; 2 and 3 – adsorption and diffusion layers; 4 and 5 – positively and negatively charged particles in the diffusion layer; 6 – crystal lattice that consists of CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , etc.

газы, впоследствии возможно использовать в бетонной промышленности в качестве наполнителей.

В ходе проведенных испытаний было показано, что КШ обладает наилучшими сорбционными свойствами по сравнению с известью Ca(OH)_2 , которая используется в качестве добавок в рассмотренной технологии (рис. 4). При производстве обожженной извести образуется большое количество парниковых газов, выбросы которых в атмосферу снижают экологические показатели, что влечет за собой дополнительные выплаты [6].

Из проведенных наблюдений можно подвести итог, что присутствие оксида кальция в материале сорбента играет значительную роль. Также отсутствие этого компонента снижает сорбционную способность всего вещества до минимума [7].

Многокомпонентный химический состав КШ значительно меняет сорбционные свойства этого материала, что наблюдается на рис. 5.

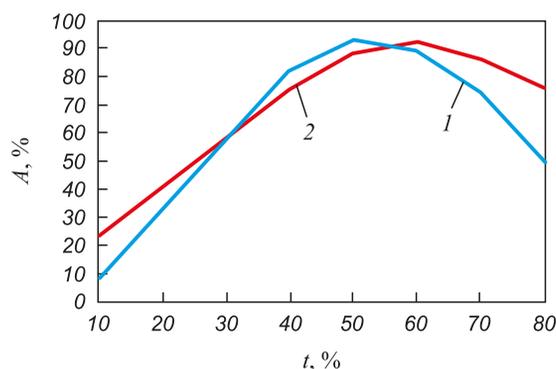


Рис. 4. Сравнительная относительная адсорбционная способность (A) КШ по SO_2 от времени (t): 1 – известковые растворы; 2 – раствор с КШ

Fig. 4. RM comparative relative adsorption capacity (A) for SO_2 over time (t): 1 – lime solutions; 2 – solution with RM

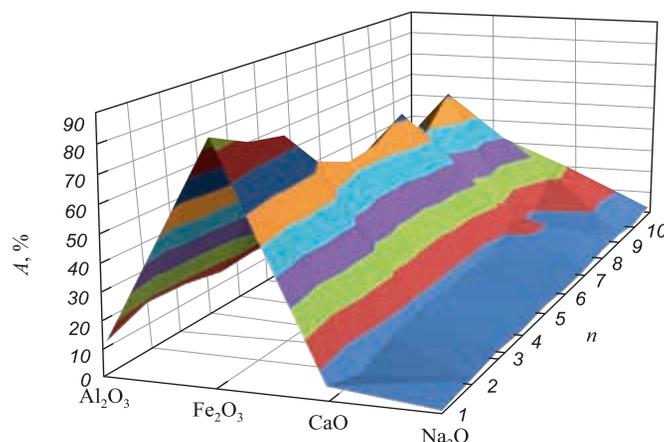


Рис. 5. Теоретическая емкость (A) проб (n) отвалных шламов глиноземного производства по SO_2

Fig. 5. Theoretical capacity (A) of samples (n) of waste sludge of alumina production for SO_2

Из графика видно, что теоретической наибольшей поглотительной способностью по сернистому газу обладает оксид железа, который кратно повышает показатели поглощения серосодержащих веществ. Результаты теоретической емкости красных шламов показаны на рис. 6.

Выводы

В связи с тем, что хранение КШ в шламонакопителях наносит вред окружающей среде и несет в себе риски возникновения экологической катастрофы, является актуальным поиск вариантов переработки КШ вместо их складирования. Установлены сорбционные свойства КШ, открывающие возможности использования шламов в многочисленных вариантах очистки промышленных газов от токсичных соединений серы. Установлен механизм предотвращения выхода в атмосферу газообразных соединений серы в процессе грануляции доменных шлаков не только с экологическим, но и с экономическим эффектом, за счет исключения затрат на приобретение и разлом обычно применяющихся природных минералов известняка и извести.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экологическая катастрофа в Венгрии // Газета «Правда». № 112 (29599). 13 октября, 2010.
2. Трушко В.Л., Утков В.А., Бажин В.Ю. Актуальности и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки горного института. 2017. Т. 227. С. 547 – 553.
3. Утков В.А. Переработка красных шламов. – В кн.: Ресурсосберегающие и природозащитные технологии в производстве глинозема, алюминия, магния и сопутствующей продукции: Материалы Межд. науч.-практ. конференции. – СПб: РУСАЛ ВАМИ, 2006. С. 323 – 325.

4. Lebedev A.B., Utkov V.A., Kaygorodova O.A. Use of dumped red mud of alumina industry at granulation of the molten sulfur-containing blast furnace slag // *Periódico tchê química*. 2019. Vol. 16. No. 31. P. 837 – 845.
5. Wanchao Liu, Jiakuan Yang, Bo Xiao. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China // *International Journal of Mineral Processing*. 2009. Vol. 93. Issues 3-4. P. 220 – 231.
6. Klauber C., Gräfe M., Power G. Review of Bauxite Residue “Reuse” Options. CSIRO, 2009. – 66 p.
7. Thakur R.S., Sant B.R. Utilization of red mud. 1. Analysis and utilization as raw material for absorbents, building-materials, catalysts and pollution problems // *J. Sci. Ind Res.* 1983. No. 42(2). P. 87 – 108.
8. Klauber C., Gräfe M., Power G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization // *Hydrometallurgy*. 2011. Vol. 108. P. 11 – 32.
9. Alípio Júnior, Américo Borges, Ayana Oliveira. Using a Multivariate Statistical in the Identification of Alumina Loss in Red Mud // *Brasil. Light Metals*. 2013. No. 2. P. 87 – 89.
10. Venancio L.A., M Paiva A.E., Macedo E.N., Antonio J., Souza S. Bauxite residue neutralization with carbon sequestration // *Brazil. Light Metals*. 2010. No. 167. P. 185 – 193.
11. Сенник А.И., Милоков С.В., Прошкина О.Б. Образование выбросов сероводорода при внешней грануляции доменных шлаков // *Вестник МГТУ им. Г.Н. Носова*. 2008. № 3. С. 75 – 79.
12. Яковлев М.Г. Технология получения агломерата из отвальных красных шламов глиноземного производства. Автореф. дис. к.т.н. – Санкт-Петербург, 2013. – 20 с.
13. Мемоли Ф., Гуззон М. Рециклинг печных побочных продуктов инжекцией в электродугую печь – опыт и перспективы // *Черные металлы*. 2007. № 4. С. 26 – 33.
14. Ли Т.С., Чой И.С., Сон В.Е. Технология утилизации ковшового шлака // *Черные металлы*. 2004. № 5. С. 28 – 33.
15. Школьник Я.Ш., Шакуров А.Г., Мандель М.З. Новая технология и оборудование для переработки шлаковых расплавов // *Металлург*. 2011. № 10. С. 58 – 60.
16. Kuhn M., Drissen P., Schrey H. Successful treatment of liquid BOF slag at Thyssen Krupp Steel works to solve the problem of volume stability. Proc. 3rd European Oxygen Steelmaking Conf. – Birmingham, U. K., Oct-Nov, 2000. P. 521 – 531.
17. Алешин А., Остроушко А., Пустовалов Ю. Рациональность и отвал // *Металл*. 2008. № 7. С. 50 – 52.
18. Кравченко В.П. Анализ способов грануляции шлаковых расплавов и факторов, влияющих на качество граншлака // *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. Вип. 30 (1). С. 51 – 58.
19. Арбузов В.А., Исанова Б.Х., Белякова М.О. Очистка дымовых газов ТЭЦ от оксидов серы и азота // *Литье и металлургия*. 2009. № 3 (52). С. 99 – 103.
20. Сорокин Ю.В., Демин Б.Л. Экологические и технологические аспекты переработки сталеплавильных шлаков // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2003. № 3. С. 75 – 79.
21. Гроспич К.Х., Эверс В., Домбровски Г. Новая установка грануляции шлака: улучшение хода процесса и повышение производительности // *Черные металлы*. 2004. № 1. С. 20 – 26.
22. Воскобойников В.Г., Кудрин В.Я., Якушев А.М. Общая металлургия. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 768 с.
23. Ergac E., Apak R. Furnace smelting and extractive metallurgy of red mud: Recovery of TiO₂, Al₂O₃ and pig iron // *Chem. Technol. Biotechnol.* 1997. Vol. 70. № 3. P. 241 – 246.
24. Moggridge M. Destroying the red menace // *Alum. Int. Today*. 2012. P. 51 – 54.
25. Sushil S., Batra V. Catalytic applications of red mud, an aluminium industry waste: A review // *Appl. Cat. B - Environ.* 2008. Vol. 81. No. 1 – 2. P. 64 – 77.
26. Atasoy A. The comparison of the Bayer process wastes on the base of chemical and physical properties. // *Therm. Anal. Calor.* 2007. Vol. 90. No. 1. P. 153 – 158.

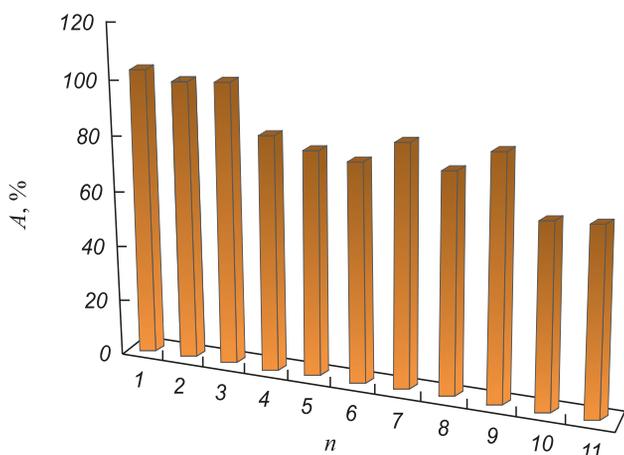


Рис. 6. Общая теоретическая емкость (A) проб (n) отвальных шламов глиноземного производства по SO₂

Fig. 6. Total theoretical capacity (A) of samples (n) of waste sludge of alumina production for SO₂

27. Justiz-Smith N., Buchanan V., Oliver G. The potential application of red mud in the production of castings // *Mat. Sci. Eng. A*. 2006. Vol. 420. No. 1 – 2. P. 250 – 253.
28. Jamieson E., Jones A., Cooling D., Stockton N. Magnetic separation of Red Sand to produce value // *Min. Eng.* 2006. Vol. 19. No. 15. P. 1603 – 1605.
29. Paramguru R., Rath P., Misra V. Trends in red mud utilization – A review // *Min. Process. Extract. Metall. Rev.* 2005. Vol. 26. No. 1. P. 1 – 29.
30. Matheson M., Xie D., Jahanshahi S. Literature review of red mud treatments for safe disposal, utilization and value recovery // Centre for Sustainable Resource Processing. Clayton. 2005. P. 78.

Поступила в редакцию 9 июля 2018 г.
После доработки 29 ноября 2018 г.
Принята к публикации 25 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 4, pp. 276–282.

INTERACTION OF MOLTEN SLAG WITH SOLID PHASE OF RED SLUDGE

A.B. Lebedev, V.A. Utkov, E.M. Gutema

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract. Granulated blast furnace slag is steadily used in large quantities in production of cements, in road construction, agriculture and in other areas of engineering and technology. Peculiarity of its production process is active interaction of molten metallurgical slag with cooling liquid. Simultaneously and instantly, slag solidifies and the mass of the latter breaks up in the atmosphere of hot steam into small particles due to critical stresses occurring. The problem is that during granulation of slags, usually containing sulfur, large amount of harmful substances (sulfur oxide and hydrogen sulfide) is released into the atmosphere. Its concentration at work sites - sites of granulation many times exceeds the MPC. To combat this phenomenon, finely dispersed, expensive lime or limestone is introduced into the composition of cooling liquid. This is associated with high costs for the construction of crushing, grinding and dust treatment equipment. In addition, placement of such equipment is hampered by the lack of free space in the blast furnaces. In this work, it is shown that lime and limestone can be replaced by fine red mud (RM), a waste from the production of alumina from bauxite. This material also has properties of absorption of sulfur compounds from the gas phase. The problem of its processing is also an urgent task. At present, RM is located in sludge storage facilities that are harmful to environment, and destruction of the enclosing dam leads to an environmental catastrophe (Hungary, 2010). This article presents the results of study of RM use. Sorption properties of RM of 6 plants were studied under laboratory conditions. The samples of granulated slag obtained in the process of interaction with RM were investigated. Laboratory and industrial tests were conducted. It was found that with its help, concentration of sulfur gases at granulation work sites can be reduced by twice. It is important that the new granulated slag, called “sludge-slag” in this case, is not inferior to the usual one by its basic technological properties.

Keywords: metallurgical slag, granulation, industrial gases, red mud, metal oxides, sorbent, adsorption, sludge – slag, sorption capacity.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-276-282

REFERENCES

- Ecologic disaster in Hungary. *Gazeta “Pravda”*. 2010, no. 112 (29599), October 13. (In Russ.).
- Trushko V.L., Utkov V.A., Bazhin V.Yu. Relevance and ways of full processing of red mud from alumina production. *Zapiski gornogo instituta*. 2017, vol. 227, pp. 547–553. (In Russ.).
- Utkov V.A. Red mud recycling. In: *Resursosberegayushchie i prirodoshchitnye tekhnologii v proizvodstve glinozema, alyuminiya, magniya i soputstvuyushchei produktsii: Materialy Mezhd. nauch.-prakt. konferentsii* [Resource-saving and environment protection technologies in production of alumina, aluminum, magnesium and related products: Materials of Int. Sci.-Pract. Conf.]. St. Petersburg: RUSAL VAMI, 2006, pp. 323–325. (In Russ.).
- Lebedev A.B., Utkov V.A., Kaygorodova O.A. Use of dumped red mud of alumina industry at granulation of the molten sulfur-containing blast furnace slag. *Periodico tchê quimica*. 2019, vol. 16, no. 31, pp. 837–845.
- Wanchao Liu, Jiakuan Yang, Bo Xiao. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China. *International Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 93. Issues 3–4, pp. 220–231.
- Klauber C., Gräfe M., Power G. *Review of Bauxite Residue “Re-use” Options*. CSIRO, 2009, 66 p.
- Thakur R.S., Sant B.R. Utilization of red mud. I. Analysis and utilization as raw material for absorbents, building-materials, catalysts and pollution problems. *J. Sci. Ind Res.* 1983, no. 42(2), pp. 87–108.
- Klauber C., Gräfe M., Power G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization. *Hydrometallurgy*. 2011, vol. 108, pp. 11–32.
- Alípio Júnior, Américo Borges, Ayana Oliveira I. Using a multivariate statistical in the identification of alumina loss in red mud. *Brasil. Light Metals*. 2013, no. 2, pp. 87–89.
- Venancio L.A., M Paiva A.E., Macedo E.N., Antonio J., Souza S. Bauxite residue neutralization with carbon sequestration. *Brazil. Light Metals*. 2010, no. 167, pp. 185–193.
- Sennik A.I., Milyukov S.V., Proshkina O.B. Hydrogen sulfide emissions at external granulation of blast furnace slags. *Vestnik MGTU im. G.N. Nosova*. 2008, no. 3, pp. 75–79. (In Russ.).
- Yakovlev M.G. *Tekhnologiya polucheniya aglomerata iz otval’nykh krasnykh shlamov glinozemnogo proizvodstva: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Technology of sinter obtaining from dump red mud of alumina production. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. St. Petersburg: 2013, 20 p. (In Russ.).
- Memoli F., Guzzon M. Recycling of furnace by-products by injection into an electric arc furnace - experience and prospects. *Chernye metally*. 2007, no. 4, pp. 26–33. (In Russ.).
- Li T.S., Choi I.S., Son V.E. Ladle slag recycling technology. *Chernye metally*. 2004, no. 5, pp. 28–33. (In Russ.).
- Shkol’nik Ya.Sh., Shakurov A.G., Mandel’ M.Z. New technology and equipment for recycling slag melt. *Metallurgist*. 2012, vol. 55, no. 9–10, pp. 724–726. (In Russ.).
- Kuhn M., Drissen P., Schrey H. Successful treatment of liquid BOF slag at Thyssen Krupp Steel works to solve the problem of volume stability. *Proc. 3rd European Oxygen Steelmaking Conf. Birmingham, U. K.*, Oct–Nov, 2000, pp. 521–531.
- Aleshin A., Ostroushko A., Pustovalov Yu. Rationality and dump. *Metall.* 2008, no. 7, pp. 50–52. (In Russ.).
- Kravchenko V.P. Analysis of slag melts granulation methods and factors affecting quality of slag. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki*. 2015, no. 30 (1), pp. 51–58.
- Arbuzov V.A., Isanova B.X., Belyakova M.O. TPP flue gas cleaning of sulfur and nitrogen oxides. *Lit’e i metallurgiya*. 2009, no. 3 (52), pp. 99–103. (In Russ.).
- Sorokin Yu.V., Demin B.L. Environmental and technological aspects of steelmaking slag processing. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta “Chermetinformatsiya”*. 2003, no. 3, pp. 75–79. (In Russ.).

21. Grosnich K.X., Evers V., Dombrovski G. Advanced slag granulation plant: improving process and increasing productivity. *Chernye metally*. 2004, no. 1, pp. 20–26. (In Russ.).
 22. Voskoboinikov V.G., Kudrin V.Ya., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya* [Basic metallurgy]. Moscow: Akademkniga, 2002, 768 p. (In Russ.).
 23. Ercag E., Apak R. Furnace smelting and extractive metallurgy of red mud: Recovery of TiO_2 , Al_2O_3 and pig iron. *Chem. Technol. Biotechnol.* 1997, vol. 70, no. 3, pp. 241–246.
 24. Moggridge M. Destroying the red menace. *Alum. Int. Today*. 2012, pp. 51–54.
 25. Sushil S., Batra V. Catalytic applications of red mud, an aluminium industry waste: A review. *Appl. Cat. B - Environ.* 2008, vol. 81, no. 1-2, pp. 64–77.
 26. Atasoy A. The comparison of the Bayer process wastes on the base of chemical and physical properties. *Therm. Anal. Calor.* 2007, vol. 90, no. 1, pp. 153–158.
 27. Justiz-Smith N., Buchanan V., Oliver G. The potential application of red mud in the production of castings. *Mat. Sci. Eng. A*. 2006, vol. 420, no. 1–2, pp. 250–253.
 28. Jamieson E., Jones A., Cooling D., Stockton N. Magnetic separation of Red Sand to produce value. *Min. Eng.* 2006, vol. 19, no. 15, pp. 1603–1605.
 29. Paramguru R., Rath P., Misra V. Trends in red mud utilization – A review. *Min. Process. Extract. Metall. Rev.* 2005, vol. 26, no. 1, pp. 1–29.
 30. Matheson M., Xie D., Jahanshahi S. Literature review of red mud treatments for safe disposal, utilization and value recovery. *Centre for Sustainable Resource Processing*. Clayton. 2005, p. 78.
- Funding.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project registration number 11.4098.2017 / PCh from 01.01.2017).
- Information about the authors:**
- A.B. Lebedev**, Postgraduate of the Chair of Metallurgy (2799957@mail.ru)
V.A. Utkov, Dr. Sci. Eng., Professor of the Chair “Automation of Technological Processes and Manufactures” (UtkovVA@yandex.ru)
E.M. Gutema, Postgraduate of the Chair of Metallurgy (endalkem5@gmail.com)
- Received September 9, 2018
 Revised November 16, 2018
 Accepted December 25, 2018