

## Оценка состава и микроструктуры алюмосодержащего отхода для обоснования направлений его использования

© 2018. А. А. Мартынова, аспирант, Г. М. Батракова, д. т. н., доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: eco@pstu.ru

Комплексная переработка промышленных отходов с извлечением ценных компонентов и использованием отходов в качестве вторичных материальных ресурсов обеспечивает снижение антропогенной нагрузки на компоненты окружающей среды. В процессе термического уничтожения энергонасыщенных материалов образуется отход с большим содержанием оксида алюминия. Для определения направлений использования алюмосодержащего отхода проведено исследование его состава и микроструктуры. Используются методы сканирующей электронной микроскопии и методы количественного физико-химического анализа. Для исследования были подготовлены строительные образцы с добавками отхода и образцы отхода, очищенного минеральными кислотами и водой.

Состав изучаемого алюмосодержащего отхода соответствовал требованиям к сырьевым материалам, используемым в качестве упрочняющей добавки в цементных смесях, жаростойких растворах (бетонах) и при изготовлении вяжущих веществ. Уплотнение структуры исследованных образцов сферическими частицами  $Al_2O_3$  влияло на прочностные характеристики образцов на основе гипса с добавкой шлама. Проведено сравнение физико-механических характеристик образцов с 15- и 30%-ным содержанием отхода с результатами испытаний контрольного образца гипса.

Исследование микроструктуры и элементный анализ отхода, очищенного минеральными кислотами, показали, что состав включений неоднороден. Обработка кислотами и водой эффективны для освобождения алюмосодержащего отхода от примесей, массовое содержание алюминия в очищенных образцах увеличивалось.

Результаты оценки состава и структуры отхода могут быть использованы при объяснении процессов формирования структуры новых материалов на алюмоокислородной основе, процессов структурообразования в керамических материалах, которые будут изготовлены с применением данного вида отхода.

**Ключевые слова:** алюмосодержащие отходы, оксид алюминия, шлам, энергодисперсионный микроанализ.

## Assessment of the composition and the microstructure of aluminium-containing waste for the substantiation of the directions of its use

© 2018. А. А. Martynova, G. M. Batrakova, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy Prospect, Perm, Russia, 614990, e-mail: eco@pstu.ru

Complex recycling of industrial wastes involves the extraction of valuable components and the use of waste as secondary material resources. Implementation of resource-saving technologies reduces the anthropogenic load on the environment. In the process of thermal destruction of calorific materials, waste with a high content of aluminum oxide is generated. In order to determine the directions of usage of alumina-containing waste the initial study of its composition and structure was made. The methods of scanning electron microscopy and quantitative physicochemical analysis were used. The following samples were studied: construction samples with waste additives (15 and 30%), and a series of samples purified with mineral acids and water.

The mineral composition of the alumina waste corresponded to the requirements for raw materials for use as a reinforcing additive in cement mixtures, heat-resistant concretes and for the manufacture of binders. Compaction of the structure by spherical particles  $Al_2O_3$  affects the strength characteristics of gypsum binder samples. A comparison is made between the physico-mechanical characteristics of samples with different waste content and control sample of gypsum.

A study of the microstructure and element analysis of waste, purified by mineral acids, was made. The analysis showed an inhomogeneous composition of impurities. Treatment of waste with acids and water is effectively remove impurities, at the same time mass content of aluminum in the purified samples is increasing.

The results of evaluation of waste structure and composition can be used for explanation of materials formation with new structure on aluminum-oxygen basis and ceramic materials formation that can be manufactured using this type of waste.

**Keywords:** aluminum-containing wastes, aluminium oxide, sludge, energy-dispersive microanalysis.

В больших объёмах алюмосодержащие отходы образуются на предприятиях химической отрасли, металлургии, в производстве глинозёма, в энергетической отрасли и прочих. К таким отходам относят гидроалюмокарбонатные осадки, бокситовые, нефелиновые, оксалатные шламы, литейные шлаки, золошлаковые отходы и золы уноса. Размещению в окружающей среде подобных отходов уделяется много внимания по причинам их пыления и локального загрязнения воздуха крупными и мелкодисперсными частицами; при хранении обводнённых отходов трудно полностью исключить риск образования промоин в шламонакопителях; при низких и высоких значениях pH почвенных растворов появление соединений алюминия способствует изменению соотношения питательных элементов и состава почвенных биоценозов.

Отходы с высоким содержанием оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) характеризуются высоким ресурсным потенциалом, поэтому их комплексная переработка с извлечением ценных компонентов является перспективным направлением для ресурсосберегающих и малоотходных технологий [1–4]. Направления использования алюмосодержащих отходов следует определять с учётом их минералогического и химического состава, дисперсности, токсичности, удельных объёмов образования, возможности организации замкнутых производственных циклов. В мировой практике из природного и техногенного алюмосодержащего сырья получают абразивные материалы, техническую керамику, износостойкие и кислотоупорные элементы специального назначения.

Многочисленными исследованиями и практическим внедрением доказана перспективность использования алюмосодержащих отходов для производства минеральных вяжущих веществ, алюминатных цементов, тяжёлых и мелкозернистых бетонов, теплоизоляционных материалов, сухих строительных смесей и др. [1, 5–7]. При этом производство товарной продукции строительного назначения не предъявляет высоких требований к исходному составу сырья и является одним из вариантов низкочастотных способов переработки техногенного глинозёма. Быстрый рост прочности, увеличение плотности, способность к твердению при пониженных температурах и другие свойства определяют спрос на подобный отход в качестве минеральной добавки к сырьевым составам.

Отличительной особенностью технологий применения алюмосодержащих отходов для изготовления гипсовых вяжущих (гипсового камня) и материалов на их основе является исключение этапа высокотемпературного синтеза, отсутствие выбросов  $CO_2$ , пыли и других вредных веществ, снижение энергоёмкости производства по сравнению с производством клинкера и извести. Исследование микроструктуры вяжущих веществ техногенного происхождения направлено на получение новых данных о механизме твердения при создании гипсового камня и изделий на его основе с заданными свойствами.

Оксид алюминия в качестве сырья для изготовления технической керамики придаёт изделиям на его основе твёрдость, низкую плотность, хорошую теплопроводность, химическую инертность, коррозионную стойкость, электроизоляционные свойства. Эти свойства востребованы в изготовлении огне- и кислотоупорных материалов, электроизоляционных и термостойких керамических изделий, катализаторов на керамической основе, керамических пигментов и др. [3–5, 8, 9]. В производстве технической керамики важны такие характеристики из алюмосодержащего сырья как однородность, дисперсность, примесный состав, кристаллическая форма. Перспективным направлением использования высокочистого дисперсного  $Al_2O_3$  является разработка керамических композиционных материалов, армирование алюмоокислородного каркаса наноструктураторами и др. Техногенное сырьё не всегда находит широкое применение по причине недостаточной изученности сырьевых материалов с высоким содержанием примесей [8, 10–13].

С целью обеспечения высокой трещиностойкости и твёрдости при создании новых видов керамик требуется сырьё с наименьшим масштабом структуры, с высокой однородностью, минимальной пористостью и хорошо сформированными межкристаллитными границами [3, 14–17]. Таким образом, наукоемкие производства предъявляют особые требования к чистоте и однородности алюмоокислородной основы.

Для объяснения процессов структурообразования в керамических материалах на основе техногенного сырья, которые отличаются от процессов, происходящих при использовании природного минерального сырья, необходимо исследование состава и микроструктуры алюмосодержащего сырья из отходов, что и определило цель данной работы.

**Объекты и методы исследования**

В процессе горения энергонасыщенного металлизированного топлива в составе выбросов присутствуют пылевые частицы. Условия технологического процесса и способы очистки газопылевого потока влияют на размер и состав улавливаемых дисперсных частиц. В зависимости от состава топлива и условий термического процесса конденсированная фаза составляет до 370 кг/т топлива [18, 19]. В системе очистки пылегазовых выбросов собирается водная суспензия дисперсных частиц, после отстаивания и удаления воды остаётся осадок (шлам) с высоким содержанием  $Al_2O_3$ .

Шлам, собранный для проведения исследований, представлял собой комковатый, сыпучий, пылящий материал серого цвета. Предварительными исследованиями установлено содержание основных компонентов (масс. %):  $91,7-97,5 Al_2O_3$ ;  $0,2-5,0 Fe_2O_3$ ;  $0,07-0,14 SiO_2$ . Методом атомно-адсорбционного анализа установлены примеси в составе шлама (масс.%):  $Fe_2O_3 3,8 \pm 1,0$ ;  $MnO 0,04 \pm 0,01$ ;  $CuO 0,0020 \pm 0,0005$ ;  $MgO 0,010 \pm 0,003$ . Кристаллическая фаза шлама представлена частицами  $\alpha-Al_2O_3$  (корунд),  $\gamma-Al_2O_3$  и трудно идентифицируемыми формами оксида кремния [18, 20]. По результатам определения токсического действия водной вытяжки шлама на живые организмы был установлен 4-й класс опасности отхода для окружающей среды (малоопасные отходы).

Одной из задач исследований являлось определение физико-механических характеристик и структуры гипсового вяжущего, образцы которого были приготовлены с добавлением алюмосодержащего шлама. Для исследований строительных образцов использован гипс строительный марки Г-3 Б II бета-модификации (ГОСТ 125-79) и измельченный шлам (15 и 30% по массе гипса). Для каждого опытного состава изготавливали по 6 образцов. Контрольные и опытные образцы с различным содержанием шлама изготавливались из гипсового теста нормальной густоты. Перемешивание компонентов осуществлялось механическим путём в смесителе, гипсовое тесто укладывали в металлические формы баблочки, уплотняли свежеприготовленную смесь встряхиванием, через 24 ч после формования образцы извлекались из формы и хранились в течение 48 ч при нормальных воздушно-сухих условиях.

Определение физико-механических характеристик образцов на основе гипса с до-

бавками шлама проводилось в сравнении с физико-механическими характеристиками контрольного образца (гипс). Оценивалось водогипсовое отношение, предел прочности при сжатии, при растяжении и при изгибе, средняя плотность, водопоглощение по массе в соответствии с методиками ГОСТ 125-79 и ГОСТ 23789-79; коэффициент размягчения определяли по методике ТУ 21-0284757. Микроструктуру образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 TESCAN, компании Tescan (Чехия).

Для расширения сферы применения алюмосодержащего отхода разработана технология очистки шлама методом выщелачивания, промывкой водой, высушиванием и прокаливанием (Патент RU 2625575 C01 F 7/46, C01 F 7/02. Способ получения оксида алюминия).

Второй задачей исследования являлось изучение структуры очищенных образцов алюмосодержащего шлама, которое проводили на сканирующем электронном микроскопе «S-3400N», фирмы «НИТАСНИ» (Япония), оснащённым для рентгеноспектрального микроанализа энергодисперсионным спектрометром XFlash Detektor 4010, фирмы Bruker (Германия). Образцы для электронной микроскопии закрепляли с помощью смолы. Все изображения получены в режиме высокого разрешения и фазового контраста при регистрации обратно рассеянных электронов. Измерение элементного состава очищенных образцов проводили в режимах анализа по площади снимка и в отдельной точке.

Статистическая обработка данных выполнялась в программном продукте, установленном на компьютере для энергодисперсионного спектрометра XFlash Detektor 4010.

**Результаты и обсуждение**

Проводили исследования шлама из сепаратора системы газоочистки. Шлам представлял собой комковатый материал, средний размер конгломератов составлял 5–10 мм, для обеспечения визуальной определяемой однородности образец измельчали в шаровой мельнице. Измельченный шлам имел размер частиц 3–4 мкм, среднее значение плотности  $3,3 \text{ г/см}^3$  и удельную поверхность  $5000 \text{ см}^2/\text{г}$ .

При исследовании физико-механических показателей образцов на основе гипса с различным количеством алюмосодержащего шлама отмечено, что с увеличением содержания добавки от 15 до 30% водогипсовое отношение возрастало. Добавка (размер частиц 5–10 мкм)

формировала высокую удельную поверхность, повышая водопотребность гипса, при этом пластифицирующий эффект не наблюдался. Вне зависимости от содержания шлама, исследуемые образцы были не водостойкими, коэффициент размягчения составил менее 0,8, что потребует дополнительных мер защиты готовых изделий от увлажнения. Прочность образцов на сжатие в сухом и насыщенном водой состоянии увеличивалась по сравнению с контролем (на 70–117% в сухом и на 46–69% во влажном). Прочность в сухом состоянии возрастала на 22–53% по сравнению с образцом без добавки шлама, в насыщенном водой состоянии прочность образцов различается в пределах погрешности. Аналогичные результаты наблюдались при испытании на

растяжение при изгибе. Плотность образцов с содержанием шлама возрастала на 23–32% в сравнении с контролем [21].

Микроструктура строительных образцов с добавлением алюмосодержащего шлама представлена на рисунке 1, увеличение  $\times 10000$ , SE. Изменения прочностных характеристик исследованных образцов объясняются уплотнением структуры частицами  $Al_2O_3$ . Анализ снимков показал, что в сравнении с образцом чистого гипса, имеющего рыхлую структуру из призматических кристаллов, образцы с добавкой шлама имели меньшее количество пустот, кристаллы гипса и сферические частицы  $Al_2O_3$  распределены равномерно по всей площади снимка. Размеры частиц  $Al_2O_3$  варьируют в образцах с содержанием шлама 15% – от 2,89 до

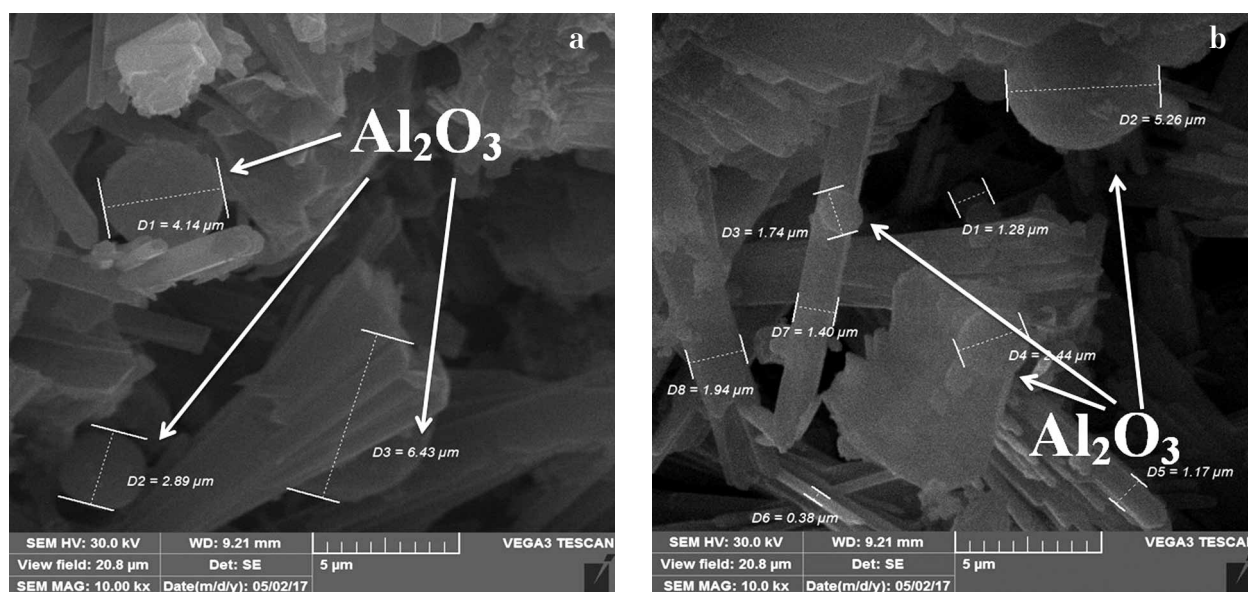


Рис. 1. Микроструктура образцов с содержанием шлама: а – 15%; б – 30%  
 Fig. 1. Microstructure of the samples with a waste content: a – 15%; b – 30%

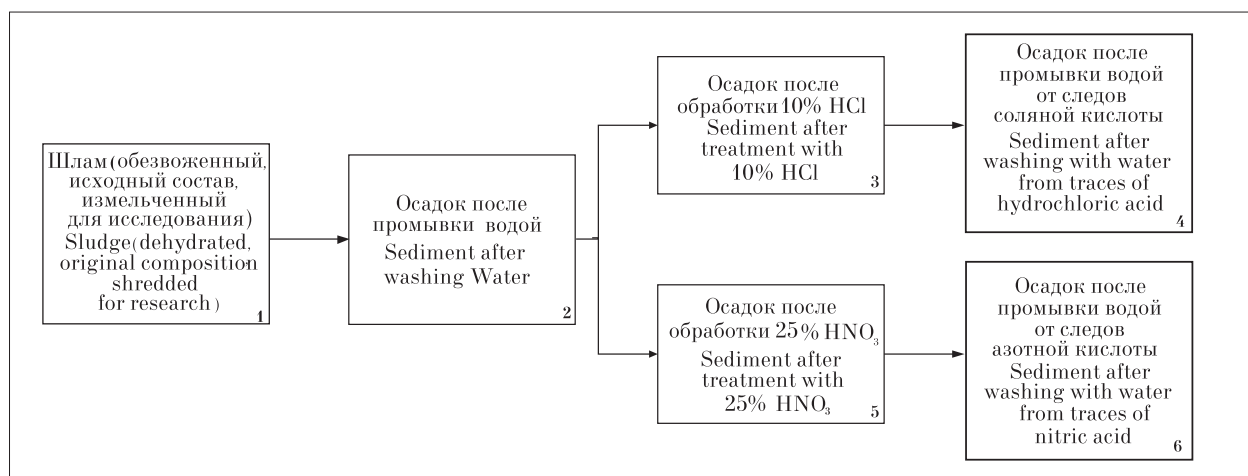


Рис. 2. Этапы подготовки образцов для исследования согласно схеме процесса очистки и нейтрализации алюмосодержащего шлама  
 Fig. 2. The steps of sample preparation for inspection according to the scheme of purification process and neutralization aluminum-containing sludge

Таблица 1 / Table 1

Поэлементный химический состав / Elemental chemical composition

Образец Sample	Содержание химических элементов, % по массе Content of chemical elements, % by weight							
	O	Al	Si	S	Cl	Cr	Ti	Fe
1	47±5	39,2±0,7	0,15±0,05	0,02±0,03	0,02±0,03	0,18±0,04	–	13,9±1,2
2	40,0±2,1	36,6±0,4	0,06±0,03	0,36±0,06	0,46±0,07	–	0,10±0,03	22,4±1,6
3	53±6	47,2±2,5	–	–	–	–	–	–
4	52±6	47,9±2,5	–	–	–	–	–	–
5	54±7	46,4±2,5	–	–	–	–	–	–
6	52±6	48,4±2,4	–	–	–	–	–	–

Примечание: «–» содержание элемента ниже предела обнаружения.  
Note: “–” content of the element below the detection limit.

6,43 мкм, в образцах с большим содержанием шлама – от 0,38 до 5,26 мкм.

Очищенные образцы алюмосодержащего шлама подготавливались по схеме процесса очистки и нейтрализации, представленной на рисунке 2. Все образцы шлама после обработки кислотами приобретали более светлый оттенок, их структура становилась более равномерной и плотной.

Методами электронной микроскопии исследовали морфологию частиц и элементный

состав очищенных образцов алюмосодержащего шлама. Анализ снимков показал, что исходный шлам представлен преимущественно сферическими частицами  $Al_2O_3$  с размером до 10 мкм. Поверхность гладких округлых частиц покрыта более мелкими частицами с размером от доли микрона. В поле снимка отмечались неплотные агрегаты, сложенные из крупных и мелких сфер размером до 50 нм.

Размер частиц  $Al_2O_3$  в исходном (неочищенном) образце составлял 0,5–10,0 мкм;

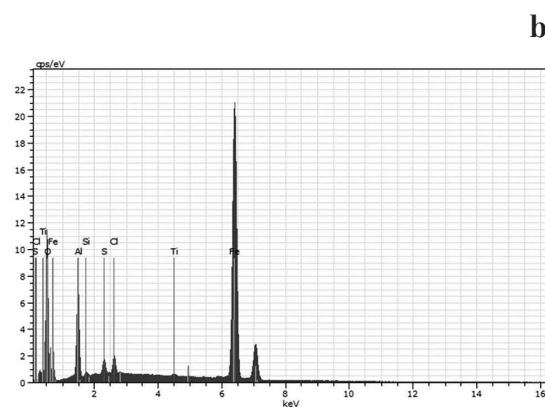
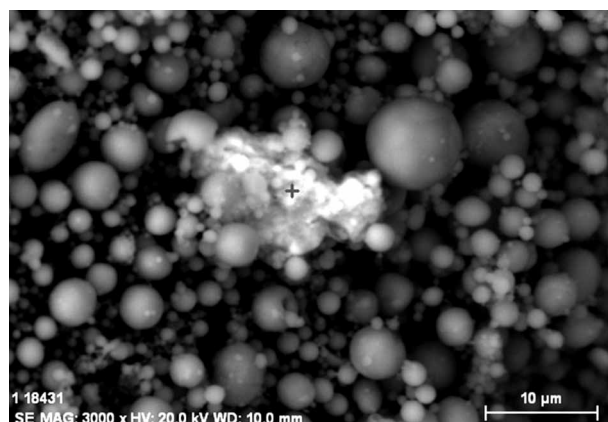
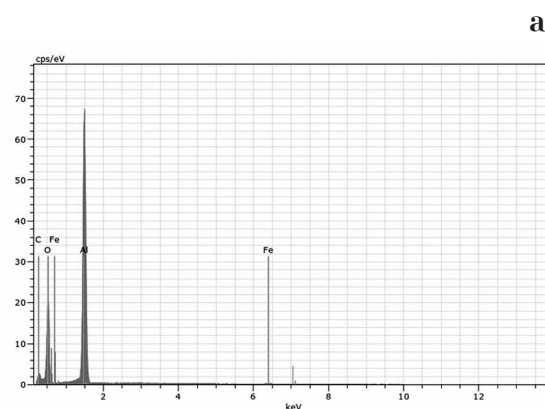
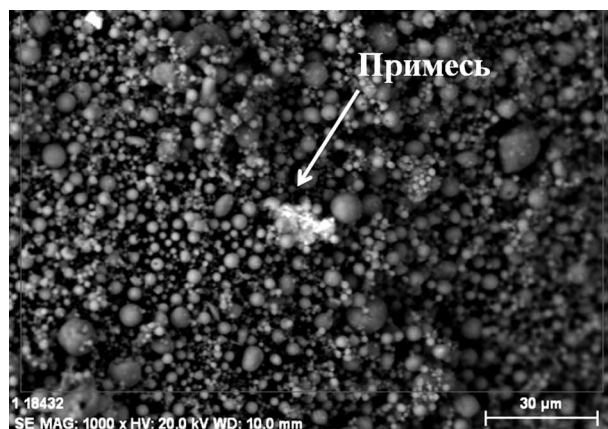


Рис. 3. Микроструктура и поэлементный химический анализ образца 2:  
а – анализ по площади снимка; б – анализ в точке снимка

Рис. 3. Microstructure and elemental chemical analysis of the sample 2:  
а – analysis over the area of the image; б – analysis at the point of the snapshot

Таблица 2 / Table 2

Исследование образцов шлама после обработки кислотами /  
Investigation of sediment samples after treatment with acids

Наименование показателей Index	Образец после обработки 10% HCl / Sample after treatment with 10% HCl	Образец после кипячения с 25% HNO <sub>3</sub> Sample 5 after boiling with 25% HNO <sub>3</sub>
Содержание / Content α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	85–90	90–95
Массовая доля / Mass fraction, % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04–0,15	следы / traces
Массовая доля / Mass fraction, % SiO <sub>2</sub>	0,02–0,07	следы / traces

после промывки водой размер частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составил 0,5–8,0 мкм (образец 2). В образцах после обработки кислотами и промывки водой (образцы 3, 4–6) размер частиц практически не изменился, но отмечено увеличение их однородности.

Результаты элементного анализа различных участков исходного и очищенных образцов показали, что химический состав включений образцов 1 и 2 неоднороден; кислотная обработка эффективна для освобождения шлама от примесей, в образцах шлама после промывки кислотами и водой массовое содержание алюминия увеличивалось. В таблице 1 представлены результаты энергодисперсионного элементного микроанализа образцов в виде среднего значения по трём точкам на снимке.

Особое внимание уделено образцам шлама после промывки водой и обработки кислотами. На микрофотографии образца 2 (шлам после промывки водой) отмечено наличие включений в виде частиц неправильной угловатой формы размером частиц до 50 мкм. Рентгеноспектральным микроанализом установлено присутствие в неочищенных образцах железа и его соединений. Микроструктура и элементный состав шлама представлены на рисунке 3, режим анализа по площади снимка выполнялся с увеличением x 1000 SE, анализ в отдельной точке – с увеличением x 3000 SE. Пики на рисунке отражают содержание химических элементов в % по массе (табл. 1).

Эффективность очистки шлама минеральными кислотами оценивалась физико-химическими методами (ГОСТ 25542.2–93 Глинозём. Метод определения оксида железа; ГОСТ 25542.1–93 Глинозём. Метод определения диоксида кремния; ГОСТ 25733–83 Глинозём. Метод кристаллооптического определения α-модификации оксида алюминия).

Характеристика состава алюмосодержащего шлама после выщелачивания представлена в таблице 2.

При обработке азотной кислотой содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> определялось на уровне пределов

обнаружения, содержание α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – незначительно выше, чем при обработке шлама соляной кислотой. Установлено, что с увеличением степени очистки от примесей (прежде всего, от оксида железа) микроструктура образцов приобретала более однородный состав по форме и размеру частиц по сравнению с неочищенным шламом (образец 1).

### Заключение

Исследование алюмосодержащего отхода, образованного в процессе горения металлургического топлива, проведённое с применением методов сканирующей электронной микроскопии, позволило изучить характеристики потенциально востребованного сырья, необходимые для объяснения структурообразования в керамических материалах, которые могут быть изготовлены с применением данного вида отхода.

Минералогический состав алюмосодержащего шлама соответствуют требованиям к сырьевым материалам для изготовления минеральных вяжущих веществ, в том числе гипсосодержащих. Повышение прочностных характеристик строительных образцов с добавкой шлама связано с процессами уплотнения структуры гипсового состава частицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Результаты исследования микроструктуры образцов шлама, очищенного минеральными кислотами, доказали высокую степень освобождения от примесей, в том числе от соединений железа. Частицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> после обработки кислотами и промывки водой имели размер 0,5–8,0 мкм, что способствует увеличению однородности и плотности структуры очищенных образцов по сравнению с неочищенным шламом.

### Литература

1. Ewaisa E.M.M., Khalilb N.M., Aminc M.S., Ahmeda Y.M.Z., Barakatd M.A. Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium

aluminate cement // *Ceramics International*. 2009. V. 35. No. 8. P. 3381–3388.

2. Огрель А.С. Алюмосодержащие отходы как потенциальное сырьё для производства промышленной продукции // *Экологический вестник России*. 2011. № 2. С. 36–40.

3. Иванов В.В., Кайгородов А.С., Хрустов В.Р., Паранин С.Н., Спирина А.В. Прочная керамика на основе оксида алюминия, получаемая с использованием магнитно-импульсного прессования композиционных нанопорошков // *Российские нанотехнологии*. 2006. Т. 1. № 1. С. 201–207

4. Анциферова И.В., Кульметьева В.Б., Порозова С.Е., Ряпосов И.В. Механическая активация ультрадисперсных порошков оксида алюминия и свойства корундовой керамики // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2008. № 1. С. 29–32.

5. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Promising use of waste coal in the production of insulating material without the use of traditional natural materials // *Inorganic materials: applied research*. 2017. V. 8. No. 5. P. 788–794.

6. Tsakiridis P.E. Aluminium salt slag characterization and utilization. A review // *Journal of Hazardous Materials*. 2012. No. 217–218. P. 1–10.

7. Kumar S., Kumar R., Bhandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries // *Resources, Conservation and Recycling*. 2006. V. 48. P. 301–314.

8. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Study of phase composition of ceramic materials based on nonferrous metallurgy chemical and petrochemical industry aluminum-containing waste // *Refractories and industrial ceramics*. 2015. V. 56. No. 5. P. 5–10.

9. Wahsh M.M.S., Sadek H.E.H., Abd El-Aleem S., Darweesh H.H.M. The effect of microsilica and aluminum metal powder on the densification parameters, mechanical properties and microstructure of alumina–mullite ceramic composites // *Advances in Materials*. 2015. V. 4. No. 4. P. 80–84.

10. Chinnam R.K., Bernardo E., Will J., Voccacini A.R. Processing of porous glass ceramics from highly crystallisable industrial wastes // *Advances in Applied Ceramics*. 2015. V. 114. P. 11–16.

11. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P.V., Kozik V.V., Gaydamak M.A. Analyzing the technology of using ash and slag waste from thermal power plants in the production of building ceramics // *YIT-UPMME 2015. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 127. P. 1–7.

12. Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015 // *Waste Management*. 2017. V. 60. P. 230–246.

13. Чукин Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2010. 288 с.

14. Чиганова Г.А. Применение химического фазового анализа для определения строения и состава ультрадисперсных частиц оксида алюминия // *Журнал аналитической химии*. 1991. Т. 46. № 7. С. 1439–1440.

15. Negri M., Ciezki H.K. Combustion of gelled propellants containing microsized and nanosized aluminum particles // *Journal of Propulsion and Power*. 2015. V. 31. No. 1. P. 400–407.

16. Земцова Е.Г., Монин А.В., Смирнов В.М., Семенов Б.Н., Морозов Н.Ф. Формирование и механические свойства алюмоокислородной керамики на основе микро- и наночастиц оксида алюминия // *Физическая мезомеханика*. 2014. Т. 17. № 6. С. 53–58.

17. Бурченко А.Е. Возможность использования вторичного сырья для получения строительной керамики // *Тувинский государственный университет. Вестник. Технические и физико-математические науки*. 2013. № 3. С. 7–14.

18. Забелин Л.В., Гафиятуллин Р.В., Поник А.Н., Мелешко В.Ю. Основы промышленной технологии утилизации крупногабаритных твердотопливных зарядов. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. 226 с.

19. Соколовский М.И., Вайсман Я.И. Технические и экологические аспекты ликвидации межконтинентальных баллистических ракет. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. 636 с.

20. Поник А.Н., Карпова Н.Ю., Батракова Г.М. Технологическая схема очистки отходов, образующихся в процессе уничтожения топливных элементов // *Экология и промышленность России*. 2015. Т. 19. № 7. С. 32–35.

21. Шаманов В.А., Батракова Г.М., Мартынова А.А., Баранюк Д.И. Оценка возможности применения отходов уничтожения энергетических материалов в качестве добавки в строительные изделия // *Техноген-2017. Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: V Форум «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов»*. Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 94–98.

## References

1. Ewaisa E.M.M., Khalilb N.M., Aminc M.S., Ahmeda Y.M.Z., Barakatd M.A. Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement // *Ceramics International*. 2009. V. 35. No. 8. P. 3381–3388.

2. Ogral A.S. Alum containing waste as a potential raw material for the production of industrial products // *Ekologicheskij vestnik Rossii*. 2011. V. 2. P. 36–40 (in Russian).

3. Ivanov V.V., Kajgorodov A.S., Hrustov V.R., Paraniin S.N., Spirina A.V. Hard alumina-based ceramics fabricated by the use of magnetic pulsed compaction of composite nanopowders // *Rossiyskie nanotehnologii*. 2006. V. 1. No. 1. P. 201–207 (in Russian).

4. Anciferova I.V., Kulmeteva V.B., Porozova S.E., Ryapov I.V. Mechanical activation of ultradisperse aluminum oxide powders and properties of corundum ceramics // *Ogneupory i tehničeskaya keramika*. 2008. No. 1. P. 29–32 (in Russian).
5. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Promising use of waste coal in the production of insulating material without the use of traditional natural materials // *Inorganic materials: applied research*. 2017. V. 8. No. 5. P. 788–794.
6. Tsakiridis P.E. Aluminium salt slag characterization and utilization. A review // *Journal of Hazardous Materials*. 2012. No. 217–218. P. 1–10.
7. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries // *Resources, Conservation and Recycling*. 2006. V. 48. P. 301–314.
8. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Study of phase composition of ceramic materials based on nonferrous metallurgy chemical and petrochemical industry aluminum-containing waste // *Refractories and industrial ceramics*. 2015. V. 56. No. 5. P. 5–10.
9. Wahsh M.M.S., Sadek H.E.H., Abd El-Aleem S., Darweesh H.H.M. The effect of microsilica and aluminum metal powder on the densification parameters, mechanical properties and microstructure of alumina–mullite ceramic composites // *Advances in Materials*. 2015. V. 4. No. 4. P. 80–84.
10. Chinnam R.K., Bernardo E.W.J., Boccaccini A.R. Processing of porous glass ceramics from highly crystallisable industrial wastes // *Advances in Applied Ceramics*. 2015. V. 114. P. 11–16.
11. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P.V., Kozik V.V., Gaydamak M.A. Analyzing the technology of using ash and slag waste from thermal power plants in the production of building ceramics // *YIT-UPMME 2015. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 127. P. 1–7.
12. Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015 // *Waste Management*. 2017. V. 60. P. 230–246.
13. Chukin G. D. The structure of aluminum oxide and hydrodesulfurization catalysts. Mechanisms of reactions. Moskva: Printing house Paladin, LLC “Printa”, 2010. 288 p. (in Russian).
14. Chiganova G.A. Application of chemical phase analysis to determine the structure and composition of ultradisperse alumina particles // *Zhurnal analiticheskoy khimii*. 1991. V. 46. No. 7. P. 1439–1440 (in Russian).
15. Negri M., Ciezki H.K. Combustion of gelled propellants containing microsized and nanosized aluminum particles // *Journal of Propulsion and Power*. 2015. V. 31. No. 1. P. 400–407.
16. Zemtsova E.G., Monin A.V., Smirnov V.M., Semenov B.N., Morozov N.F. Formation and mechanical properties of alumino-oxygen ceramics based on micro- and nanoparticles of alumina // *Physical mesomechanics*. 2014. V. 17. No. 6. P. 53–58 (in Russian).
17. Burchenko A.Ye. Possibility of using secondary raw materials for obtaining construction ceramics // *Tuva State University. Herald. Technical and physical and mathematical sciences*. 2013. No. 3. P. 7–14 (in Russian).
18. Zabelin L.V., Gafiyatullin R.V., Ponik A.N., Meleshko V.Yu. Fundamentals of industrial technology for the disposal of large-sized solid fuel charges. Moskva: OOO “Nedra-Business Center”, 2004. 226 p. (in Russian).
19. Sokolovsky M.I., Vaysman Ya.I. Technical and ecological aspects of the elimination of intercontinental ballistic missiles. Perm: Perm State Technical University, 2009. 636 p. (in Russian).
20. Ponik A.N., Karpova N.Yu., Batrakov G.M. Technological scheme for cleaning waste generated during the destruction of fuel cells // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2015. V. 19. No. 7. P. 32–35 (in Russian).
21. Shamanov V.A., Batrakov G.M., Martynova A.A., Baranyuk D.I. Evaluation of the possibility of using waste materials for the destruction of energy materials as an additive to construction products // *Tekhnogen 2017. Fundamental research and applied development of processes of processing and utilization of technogenic formations: V Forum “Ural market of scrap, industrial and municipal waste”*. Ekaterinburg: UrO RAN, 2017. P. 94–98 (in Russian).