

Использование отходов твердотопливной энергетики для синтеза вспененных геополимеров*

Яценко Е.А., Изварин А.И., Чаудхари С., Орловский П.О., Васильев Н.С.
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
г. Новочеркасск, Российская Федерация
andre.izvarin@yandex.ru

Аннотация. Вспененный геополимер является многообещающим строительным материалом. В качестве основного сырьевого материала для синтеза вспененных геополимеров использовались зола-уноса, шлак и золошлаковая смесь, а также горелая вмещающая порода отвалов угольных шахт. Использование отходов твердотопливной энергетики в качестве сырьевого материала для синтеза геополимеров позволяет снизить загрязнение окружающей среды. В качестве активатора золошлаковых отходов использовалась смесь 12 М раствора гидроксида натрия и жидкого стекла. Получение геополимерных материалов на основе отходов угледобычи происходило с использованием раствора ортофосфорной кислоты. Исследована микроструктура и фазовый состав отходов твердотопливной энергетики. Частицы топливного шлака представляют собой остеклованные частицы неправильной остроугольной формы. В золе-уноса присутствуют алюмосиликатные микрочастицы сферической и неправильной формы. Микроструктура золошлаковой смеси представлена как остеклованными частицами топливного шлака, так и сферическими частицами золы-уноса. Строение отходов угледобычи характеризуется остеклованной структурой, содержащей муллит, кварц и шпинель, и имеющая признаки оплавления и спекания. В золе-уноса, шлак и золошлаковой смеси, присутствуют одинаковые кристаллические фазы в виде α -кварца и гематита. Фазовый состав отходов угледобычи преимущественно состоит из α -кварца, гематита, муллита и кордиерита. Наилучшими технологическими свойствами обладает образец на основе золошлаковой смеси: плотность 476 ± 16 кг/м³, прочности на сжатие $0,87 \pm 0,10$ МПа.

Ключевые слова: зола-уноса, шлак, порода отвалов угольных шахт, утилизация, геополимеры.

ВВЕДЕНИЕ

В России остро стоит проблема накопления отходов угольной энергетики [1-4]. Угольная энергетика производит три вида отходов: золошлаковую смесь, золу-уноса и котельные шлаки. Каждый год образуется более 22 миллионов тонн золошлаковых отходов, но их переработка составляет только 10-12 % [5]. Согласно разным оценкам, на золошлакоотвалах России накопилось 1,4-1,8 миллиарда тонн отходов на площади свыше 20 тысяч квадратных километров [6]. Золошлакоотвалы – это гидротехнические объекты с дамбами, куда золошлаковая смесь поступает через систему трубопроводов. Эти отвалы находятся рядом с

электростанциями и жилыми районами, что делает их опасными объектами [7]. В связи с этим поиск новых методов утилизации отходов становится актуальным [8-10].

Золошлаковая смесь – это материал, состоящий из 45-60 % диоксида кремния (SiO₂), 10-30 % оксида алюминия (Al₂O₃), а также соединений кальция, магния, серы и железа [11]. Зола-уноса – это высокодисперсный материал, состоящий из сферических частиц, которые представляют собой полые алюмосиликатные сферы диаметром от 0,1 до 100 мкм [12]. Известно, что золу-уноса можно использовать в качестве добавки в цемент, бетон, строительные растворы и известково-пуццолановые смеси [13]. Зола-уноса также применяется в дорожном строительстве, при создании дамб, в сельском хозяйстве и лакокрасочной промышленности [14]. Топливные шлаки – это аморфный стекловидный материал, состоящий из минеральной несгораемой части угля. Он образуется при высокотемпературном сгорании угля (обычно при температуре выше 1300 °С) в топках тепловых электростанций и последующем охлаждении полученного расплава [15]. В отличие от золы-уноса, топливные шлаки, образующиеся при более высоких температурах, не содержат несгоревший уголь и обладают высокой однородностью. Однако их химический состав существенно зависит от типа сжигаемого угля и может варьироваться в широких пределах.

Еще одной проблемой является образование огромного количества отходов и побочных продуктов при производстве угля, включая вскрышную и вмещающую горную породу, ставшую крупнейшим по объемам образования индустриальным отходом в энергетическом комплексе.

Вскрышная и вмещающая горная порода является крупным твердым отходом, образующимся при добыче и переработке угля. По разным оценкам, на его долю приходится от 10 % до 20 % от общего объема добычи угля. В целом объем накопленных материалов из отходов угледобычи оценивается в более чем 10 700 млн. тонн, и этот объем продолжает увеличиваться в связи с добычей полезных ископаемых [16]. Их накопление в горнодобывающих районах вызывает негативные экологические и социально-экономические последствия. Порода складывается в отвалах, занимая большие площади, что приводит к изъятию земель и разрушению ландшафта. Помимо потери земельных ресурсов, беспорядочное хранение этих отходов увеличивает риск возникновения геологических опасностей (таких как оползни, сели, камнепады и обвалы грунта), вызванных

* Работа выполнена в рамках реализации проекта по соглашению о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации «Углеродно-нейтральные технологии рециклинга крупнотоннажных отходов топливной энергетики с получением функциональных геополимерных материалов» от «29» июня 2022 г., № 075-15-2022-1111.

Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Строительство, архитектура и техносферная безопасность", <https://iccats.org>

экстремальными погодными явлениями (например, проливными дождями), угрожающими жизни и безопасности имущества вокруг куч и холмов пустой породы. Тяжелые металлы в угольной пустой породе высвобождаются в результате выветривания и выщелачивания атмосферными осадками или погружением в грунтовые воды, способствующее загрязнению почвы и воды [17-19].

Химический состав вскрышной и вмещающей горной породы, образующейся при добыче угля, в значительной степени определяет пути ее возможного использования. Ее химический состав представлен в основном оксидом кремния (SiO_2), оксидом алюминия (Al_2O_3) и оксидом железа (Fe_2O_3) [20? 21].

Наличие в материалах высокой доли аморфной алюмосиликатной фазы и возможность диспергировать их до высокодисперсного состояния делают отходы угольной генерации и вскрышной и вмещающей горной породы перспективным сырьем для получения нового класса материалов – геополимеров, представляющих собой гидравлические вяжущие щелочной активации [22-24].

Развитие технологии геополимерных материалов открывает широкие перспективы в решении проблемы снижения углеродного следа, за счет снижения потребности строительной индустрии в природных минеральных ресурсах вследствие их замены на производственные отходы и крупнотоннажные отходы в топливной энергетике. В производстве геополимерных материалов отсутствует операция обжига, а в качестве сырья могут быть использованы дисперсные промышленные отходы, требующие незначительного доизмельчения, благодаря чему энергопотребление таких технологий в несколько раз ниже, чем традиционных технологий строительных материалов [25].

Геополимеры представляют собой стеклокристаллические алюмосиликатные материалы, состоящие из последовательно соединенных в цепи и кольца тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ и $[\text{AlO}_4]$, образующие двух- и трехмерные структуры [26].

Для синтеза геополимеров на основе отходов твердотопливной энергетики считается, что соотношение щелочного активирующего раствора и основного сырьевого материала в зависимости от химического состава должно составлять 0,25-0,45 [27-30].

Для более экономичного и эффективного рециклинга отходов твердотопливной энергетики необходимо чтобы в состав сырьевой смеси входило как можно большее количество отходов. Поэтому оптимальное количество отходов топливной энергетики для синтеза вспененных геополимеров составляет от 70 %.

Таким образом, целью работы является исследование возможности использования отходов твердотопливной энергетики для синтеза вспененных геополимеров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основного сырьевого материала для синтеза вспененных геополимеров использовались зола-уноса, шлак и золошлаковая смесь (ЗШС) Новочеркасской ГРЭС, а также горелая вмещающая порода отвалов угольных шахт (ГПО), сформированных при добыче угля подземным способом на территории Ростовской области (Красносулинский район, г. Гуково, п. Алмазный). Компонентами активирующего раствора являлись гидроксид натрия и силикат натрия, 85 %-й водный раствор ортофосфорной кислоты, порообразователь – алюминиевый порошок. Химический состав основных сырьевых материалов представлен в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав исследуемых отходов, мас. %, %

Компонент	Шлак	Зола-уноса	ЗШС	ГПО
Na_2O	1,1	0,9	0,9	-
MgO	2,0	1,3	2,1	0,69
Al_2O_3	22,0	20,6	18,8	19,49
SiO_2	56,1	46,8	51,3	52,71
K_2O	3,6	3,3	3,0	4,75
CaO	2,9	2,0	3,1	1,20
TiO_2	0,9	0,8	0,8	1,35
MnO	0,1	0,1	0,1	0,14
Fe_2O_3	10,7	8,7	10,3	17,37
P_2O_5	0,1	0,1	0,1	-
SO_3	0,1	0,4	0,3	1,18
ППП	0,4	15,0	9,2	0,5

Как видно из табл. 1, во всех материалах присутствует значительное количество SiO_2 и Al_2O_3 что свидетельствует о том, что материалы относятся к алюмосиликатам и могут быть использованы для получения геополимерных материалов, так как последние представляют собой материалы, состоящие из цепей Si-O-Si и Al-O-Si . Кроме того, также в трех материалах присутствует значительное количество Fe_2O_3 .

Получение геополимерных материалов на основе золошлакового материала происходило использованием щелочного активатора по следующей технологии: готовят раствор гидроксида натрия путем смешивания 2 мас.% порошка NaOH и 4 мас.% воды. Затем смешивают полученный раствор с 21 мас.% силикатом натрия и добавляют в него 76 мас.% ЗШО. Далее в полученную смесь добавляют 1 мас.% порообразователя – порошка алюминия, после чего смесь перемешивают, заливают в формы и отправляют на отверждение при температуре 80 °C в течение 12 часов.

Получение геополимерных материалов на основе отходов угледобычи происходило с использованием раствора ортофосфорной кислоты в качестве активатора. 25 мас.% ГПО смешивали с 75 мас.% раствором 12 М ортофосфорной кислоты и перемешивали вручную в течение 10 минут. Полученная паста помещалась в и подвергалась вспениванию и отверждению в микроволновой печи при 800 Вт в течение 10 мин.

Исследование микроструктуры отходов твердотопливной энергетики выполнено с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA TESKAN (Чехия) при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском порошковом дифрактометре ARLX'TRA (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США) с фокусировкой лучей на отражение по методу Брегга-Брентано

Плотность геополимеров определялась как отношение массы к его объему.

Прочность на сжатие образцов определялась на гидравлическом прессе марки ТП-1-1500.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные изображения микроструктуры отходов твердотопливной энергетики приведены на рис. 1.

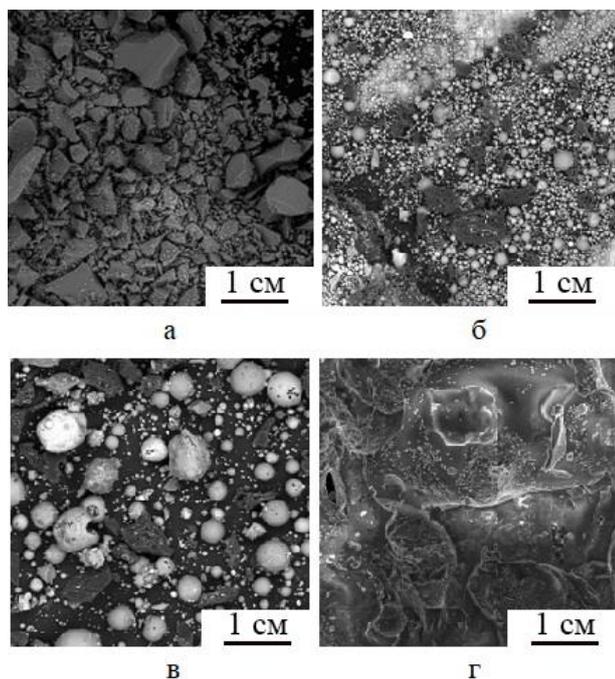


Рис. 1. Микроструктура отходов твердотопливной энергетики:
а – шлак; б – зола-уноса; в – ЗШС; г – ГПО

Из рис. 1 видно, что частицы топливного шлака представляют собой остеклованные частицы неправильной остроугольной формы, при этом, их размер колеблется в интервале 10-100 мкм. За счет длительного нахождения топливного шлака в камерах котлов сжигания угля в высокотемпературной зоне, они почти полностью представлены стеклофазой.

В золе-уноса присутствуют микрочастицы сферической и неправильной формы. Сферические частицы являются алюмосиликатными полыми микросферами, образованными при высокотемпературном факельном сжигании угля и вспучивании расплавленной стекломассы. Размер алюмосиликатных полых микросфер составляет 1-20 мкм, однако отдельные частицы достигают размера 30 и более мкм. Они имеют гладкую остеклованную поверхность. Наиболее однородные из них полностью состоят из стекловидного вещества. При этом в золе-уноса видны нерасплавленные частицы, состоящие из мельчайших минеральных и коксовых зерен с губчатой поверхностью, которые во внутренней части могут содержать большое количество кристаллических веществ.

Микроструктура золошлаковой смеси представлена как остеклованными частицами топливного шлака, так и сферическими частицами золы-уноса, описание которых представлено выше. Это объясняется технологией гидрозолошлакоудаления на угольных электростанциях, которое заключается в дроблении образовавшихся в котлах топливного шлака, смешении его с золой-уноса и водой и совместное удаление в виде смеси на золошлакоотвалы. Строение отходов угледобычи характеризуется остеклованной структурой, содержащей муллит, кварц и шпинель, и имеющая признаки оплавления и спекания.

Полученные рентгенограммы отходов отходов твердотопливной энергетики представлены на рис. 2.

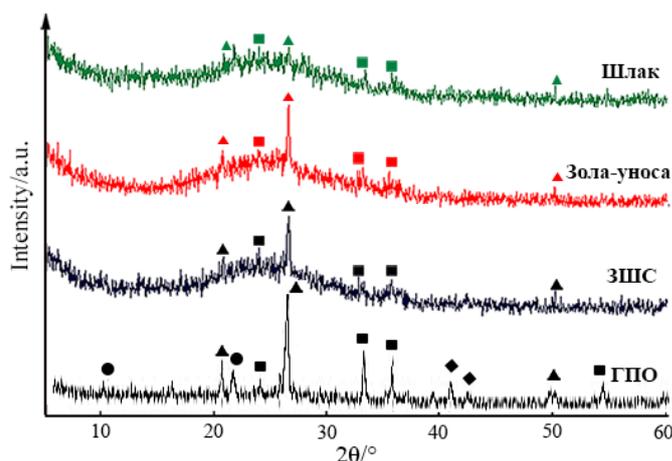


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа отходов твердотопливной энергетики:
Δ – α-кварц (SiO_2), □ – гематит (Fe_2O_3), ○ – кордиерит ($(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), ◇ – муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

Во всех исследуемых минеральных отходах угольной генерации присутствуют одинаковые кристаллические фазы в виде α-кварца (карточка PDF: 46-1045) и на пределе чувствительности измерения прибором – гематит (карточка PDF: 33-0664), что также подтверждается химическим составом (табл. 1). Фазовый состав ГПО преимущественно состоит из α-кварца, гематита, муллита и кордиерита.

На рис. 4 показана структура полученных геополимерных материалов из различных отходов твердотопливной энергетики.

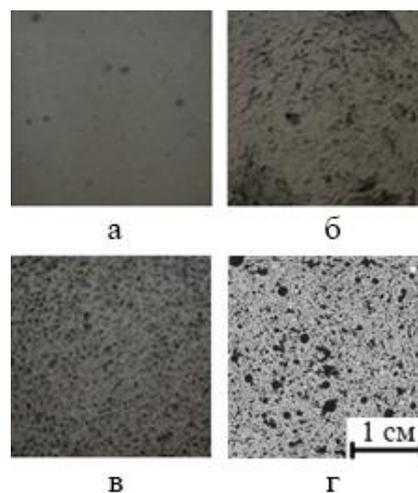


Рис. 4. Структура полученных геополимеров на основе:
а – шлака; б – золы-уноса; в – ЗШС; г – ГПО

Из рис. 4 видно, что образцы на основе шлака обладают плотной монолитной структурой, образцы на основе золы-уноса только начинают вспениваться, обладая при этом слабовыраженными порами. Развитой пористой структурой обладают только образцы, которые получены из на основе золошлаковой смеси.

В табл. 2 показаны технологические свойства полученных геополимерных материалов.

Таблица 2

Технологические свойства полученных геополимеров

Основной сырьевой материал	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
Шлак	1159 ± 45	3,53 ± 0,19
Зола-уноса	789 ± 10	2,65 ± 0,16
ЗШС	476 ± 16	0,87 ± 0,10
ГПО	1032 ± 16	1,94 ± 0,10

Из табл. 2 видно, что образец на основе золошлаковой смеси обладают наименьшей средней плотностью 476 ± 16 кг/м³ при прочности на сжатие 0,87 ± 0,10 МПа по сравнению с образцами на основе золы-уноса и шлака, что главным образом, связано с химическим составом используемого золошлака. Содержание оксида кальция в ЗШС 3,1 мас.%, в золе-уноса 2,9 мас.%, в шлаке 2,0 мас.% (таблица 1). При этом известно, что чем меньше в составе оксида кальция, тем ниже свойства материала и требуются более высокие концентрации щелочного активатора для синтеза вспененных геополимеров. Таким образом, золошлаковая смесь является наиболее подходящим сырьевым материалом для синтеза вспененных геополимеров. Образец на основе ГПО обладает плотностью 1032 ± 16 и прочностью на сжатие 1,94 ± 0,10 МПа. У образца на основе ГПО ниже свойства, чем у образца на основе ЗШС. Для улучшения данных показателей необходим подбор оптимальной концентрации раствора активатора и условий вспенивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показана возможность получения вспененных геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС, а также горелой вмещающей породы отвалов угольных шахт. Изучен химический состав отходов твердотопливной энергетики. Выявлено, что основными компонентами являются SiO₂ и Al₂O₃, что свидетельствует о том, что материалы относятся к алюмосиликатам и могут быть использованы для получения геополимерных материалов. Во всех исследуемых отходах угольной генерации присутствуют одинаковые кристаллические фазы в виде α-кварца и гематита. Фазовый состав отходов угледобычи преимущественно состоит α-кварца, гематита, муллита и кордиерита. Установлено, что золошлаковая смесь является наилучшим исходным материалом для синтеза вспененных геополимеров, образец на основе ЗШС обладает средней плотностью 476 ± 16 кг/м³ при прочности на сжатие 0,87 ± 0,10 МПа. Образец на основе ГПО имеет плотность 1032 ± 16 и прочность на сжатие 1,94 ± 0,10 МПа. Для улучшения свойств образца на основе ГПО в дальнейшем необходим специальный подбор концентрации активатора и условий вспенивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Menshov P.V. Ash and Slag Waste as a Secondary Raw Material / P.V. Menshov, Y.V. Khlupin, O.I. Nalesnik, A.V. Makarovskikh // Procedia Chem. – 2014. – vol. 10. – P. 184-191.
2. Tiwari M.K. Suitability of leaching test methods for fly ash and slag: A review / M.K. Tiwari, S. Bajpai, U.K. Dewangan, R.K. Tamrakar // J. Radiat. Res. Appl. Sci. – 2015. – vol. 8, is. 4. – P. 523-537.
3. Yatsenko E.A. Review on modern ways of insulation of reservoirs for liquid hydrogen storage / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, Y.V. Novikov, A.I. Izvarin, I.V. Rusakevich // Int. J. Hydrogen Energy. – 2022. – vol. 47, is. 97. – P. 41046-41054.

4. Yatsenko E.A. Recycling Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants to Produce Foamed Geopolymers / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, A.I. Izvarin, V.M. Kurdashov, V.A. Smolii, A.V. Ryabova, L.V. Klimova // Energies. – 2023. – vol. 16, is. 22. – 7535.

5. Petropavlovskaya V.B. Environmental management in ash and slag waste management in Russia / V.B. Petropavlovskaya, S.V. Artamonova, E.O. Shchipanskaya, E.A. Ratkevich, K.S. Petropavlovskii // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – vol. 1010, is. 1. – 12135.

6. Zhang Z. Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence / Z. Zhang, J.L. Provis, A. Reid, H. Wang // Cem. Concr. Res. – 2014. – vol. 64. – P. 30-41.

7. Яценко Е.А. Исследование структуры и свойств вспененных геополимерных материалов на основе отходов твердотопливной энергетики / Е.А. Яценко, А.И. Изварин, С. Чаудхари, В.С. Яценко // Вестник современных технологий. – 2023. – № 4(32). – С. 35-40

8. Яценко Е.А. Конструкционные геополимерные материалы на основе отходов угольной энергетики / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, Л.А. Яценко, А.И. Изварин // XII Международное Курнаковское совещание по физико-химическому анализу : сборник статей, Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2022 года. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 90-92.

9. Cherkasova T.G. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction / T.G. Cherkasova, E.V. Cherkasova, A.V. Tikhomirova, N.V. Gilyazidinova, R.V. Klyuev, N.V. Martyushev, A I. Karlina, V.Yu. Skiba // Metallurgist. – 2022. – vol. 65, is. 11-12. – P. 1324-1330.

10. Изварин А.И. Исследование порообразования теплоизоляционного геополимера на основе золошлаковых отходов / А.И. Изварин, Е.А. Яценко, Д.Н. Изварина // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2024. – № 2. – С. 63-67.

11. Pichugin E.A. Analytical review of the experience accumulated in the Russian Federation of involving ash and slag waste from thermal power plants in the economic turnover / E.A. Pichugin // Probl. Reg. Ecol. – 2019. – vol. 4. – P. 77-87.

12. Zierold K.M. A review on fly ash from coal-fired power plants : chemical composition , regulations , and health evidence / K.M. Zierold, C. Odoh. – 2020. – vol. 35, is. 4. – P. 401-418.

13. Dwivedi A. Fly ash–waste management and overview: A Review / A. Dwivedi, M.K. Jain // Recent Research in Science and Technology. – 2014. – vol. 6, is. 1.

14. Alam J. Fly ash utilization in different sectors in Indian scenario / J. Alam, M.N. Akhtar // Int. J. Emerg. Trends. Eng. Dev. – 2011. – vol. 1, is. 1. – P. 1-14.

15. Gerk S.A. Investigation of the composition and structure of fuel and energy complex waste using electron microscopic and elemental analysis / S.A. Gerk, V.A. Smolii // Izv. High. Educ. Inst. North Cauc. Reg. Tech. Sci. – 2013. – vol. 4. – P. 76-79.

16. Vo T.L. Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives / T.L. Vo, W. Nash, M. Del Galdo, M. Rezania, R. Crane, M.M. Nezhad, L. Ferrara // J. Clean. Prod. – 2022. – vol. 336. – 130213.

17. Querol X. Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China / X. Querol, M. Izquierdo, E. Monfort, E. Alvarez, O. Font, T. Moreno, A. Alastuey, X. Zhuang, W. Lu, Y. Wang // Int. J. Coal Geol. – 2008. – vol. 75, is. 2. – P. 93-104.

18. Yang L. Leaching behavior and potential environmental effects of trace elements in coal gangue of an open-cast coal

mine area, Inner Mongolia, China / L. Yang, J. Song, X. Bai, B. Song, R. Wang, T. Zhou, J. Jia, H. Pu // Minerals. – 2016. – vol. 6, is 2. – 50.

19. Wang S. Estimate of sulfur, arsenic, mercury, fluorine emissions due to spontaneous combustion of coal gangue: An important part of Chinese emission inventories / S. Wang, K. Luo, X. Wang, Y. Sun // Environ. Pollut. – 2016. – vol. 209. – P. 107-113.

20. Chuncai Z. Mobility behavior and environmental implications of trace elements associated with coal gangue: a case study at the Huainan Coalfield in China / Z. Chuncai, L. Guijian, W. Dun, F. Ting, W. Ruwei, F. Xiang // Chemosphere. 2014. – vol. 95. – P. 193-199.

21. Sun Y. Evaluating the distribution and potential ecological risks of heavy metal in coal gangue / Y. Sun, K. Xiao, X. Wang, Z. Lv, M. Mao // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2021. – vol. 28. – P. 18604-18615.

22. Panias D. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers / D. Panias, I. P. Giannopoulou, T. Perraki // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. – 2007. – vol. 301, is 1-3. – P. 246-254.

23. Liew Y.M. Influence of solids-to-liquid and activator ratios on calcined kaolin cement powder/ Y.M Liew, H. Kamarudin, A.M. Al Bakri, M. Binhussain, M. Luqman, I.K. Nizar, C.Y. Heah // Phys. Procedia. – 2011. – vol. 22. – P. 312-317.

24. Longos Jr A. Optimization of the mix formulation of geopolymer using nickel-laterite mine waste and coal fly ash /

A. Longos Jr, A.A. Tigue, I.J. Dollente, R.A. Malenab, I. Bernardo-Arugay, H. Hinode, W. Kurniawan, M.A. Promentilla // Minerals. – 2020. – vol. 10, № 12. – 1144.

25. Ерошкина Н.А. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов: монография. / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин – Пенза: ПГУАС, 2014. – 128 с.

26. Cong P. Advances in geopolymer materials: A comprehensive review / P. Cong, Y. Cheng // J. Traffic Transp. Eng. – 2021. – vol. 8, is 3. – P. 283-314.

27. Al Bakri Abdullah M.M. Optimization of alkaline activator/fly ash ratio on the compressive strength of manufacturing fly ash-based geopolymer / M. M. Al Bakri Abdullah, H. Kamarudin, O. A. Abdulkareem, C. Ghazali, A.R. Rafiza, M. Norazian // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – vol. 110. – P. 734-739.

28. Hardjito D. Study on engineering properties of fly ash-based geopolymer concrete / D. Hardjito, S.E. Wallah // Journal of the Australian Ceramic Societ. – 2002.

29. Patankar S.V. Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar / Y.M. Ghugal, S.S. Jamkar // Indian J. Mater. Sci. – 2014. – vol. 2014. – P. 1-6.

30. Choeycharoen P. A sustainable bottom ash-based alkali-activated materials and geopolymers synthesized by using activator solutions from industrial wastes / P.A. Choeycharoen, W. Sornlar, A. Wannagon // J. Build. Eng. – 2022. – vol. 54. – 104659.

DOI: 10.24892/RIJIE/20240413

Use of Solid Fuel Energy Waste for the Synthesis of Foamed Geopolymers

Yatsenko E.A., Izvarin A.I., Chaudhary S., Orlovskiy P.O., Vasiliev N.S.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Novocherkassk, Russian Federation

andre.izvarin@yandex.ru

Abstract. Foamed geopolymer is a promising construction material. Fly ash, slag and ash-slag mixture, as well as burnt host rock of coal mine dumps were used as the main raw material for the synthesis of foamed geopolymers. The use of solid fuel energy waste as a raw material for the synthesis of geopolymers allows to reduce environmental pollution. A mixture of 12 M sodium hydroxide solution and liquid glass was used as an activator for ash-slag waste. Geopolymer materials based on coal mining waste were obtained using an orthophosphoric acid solution. The microstructure and phase composition of solid fuel energy waste were studied. Fuel slag particles are vitrified particles of irregular acute-angled shape. Fly ash contains aluminosilicate microparticles of spherical and irregular shape. The microstructure of the ash and

slag mixture is represented by both vitrified particles of fuel slag and spherical particles of fly ash. The structure of coal mining waste is characterized by a vitrified structure containing mullite, quartz and spinel, and having signs of melting and sintering. In fly ash, slag and ash and slag mixture, there are identical crystalline phases in the form of α -quartz and hematite. The phase composition of coal mining waste mainly consists of hematite, mullite, opal, cordierite. The best technological properties are possessed by a sample based on ash and slag mixture: density $476 \pm 16 \text{ kg/m}^3$, compressive strength $0.87 \pm 0.10 \text{ MPa}$.

Keywords: fly ash, slag, coal mine waste rock, recycling, geopolymers.

Библиографическое описание статьи

Яценко Е.А. Использование отходов твердотопливной энергетики для синтеза вспененных геополимеров / Е.А. Яценко, А.И. Изварин, С. Чаудхари, П.О. Орловский, Н.С. Васильев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т.11, №4. – С. 77-81. DOI: 10.24892/RIJIE/20240413

Reference to article

Yatsenko E.A., Izvarin A.I., Chaudhary S., Orlovskiy P.O., Vasiliev N.S. Use of solid fuel energy waste for the synthesis of foamed geopolymers, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2024, vol.11, no.4, pp. 77-81. DOI: 10.24892/RIJIE/20240413