

РОЛЬ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ПРИМОРСКОГО КРАЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

П. Г. Козлов¹, А. В. Таскин¹, Р. С. Федюк^{1,2}, Л. Н. Алексеико³, Д. Р. Федотов¹

¹Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, 690922, г. Владивосток, Россия, kozlov.pg@dvfu.ru, taskin@yandex.ru, fedyuk.rs@dvfu.ru, fedotov.dr@dvfu.ru

²Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России «Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству», ул. Бородинская, 14, 690033, г. Владивосток, Россия

³Гомельский государственный медицинский университет, ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь, Alexeiko.ln@mail.ru

Данная статья посвящена изучению химического состава золошлаковых отходов, образующихся в Приморском крае. Состав этих отходов существенно варьируется в зависимости от типа угля, сжигаемого на местных ТЭС. Эта неоднородность создает проблемы при применении золошлаков в строительстве, поскольку требует тщательного анализа каждой партии и корректировки производственных технологий.

Ключевые слова: геополимеры, золошлаковые отходы, редкоземельные элементы, химический состав.

THE ROLE OF ASH AND SLAG WASTE FROM PRIMORSKY KRAI IN THE PRODUCTION OF GEOPOLYMER BUILDING MATERIALS

P. G. Kozlov¹, A. V. Taskin¹, R. S. Fedyuk^{1,2}, L. N. Alekseyko³, D. R. Fedotov²

¹Far Eastern Federal University, p. Ajax, 10, Russkiy Island, 690922, Vladivostok, Russia, kozlov.pg@dvfu.ru, taskin@yandex.ru, fedyuk.rs@dvfu.ru, fedotov.dr@dvfu.ru

²Branch of FGBU CNIIIP of the Ministry of Construction of the Russian Federation "Far Eastern Scientific Research, Design and Technological Institute for Construction", str. Borodinskaya, 14, 690033, Vladivostok, Russia

³Gomel State Medical University, str. Lange, 5, 246000, Gomel, Republic of Belarus, Alexeiko.ln@mail.ru

This article is devoted to the study of the chemical composition of ash and slag waste generated in Primorsky Krai. The composition of these wastes varies significantly depending on the type of coal burned at local thermal power plants. This heterogeneity creates problems when using ash and slag in construction, as it requires a thorough analysis of each batch and adjustments to production technologies.

Keywords: geopolymers, ash and slag waste, rare earth elements, chemical composition.

Утилизация отходов промышленной деятельности важная составная часть финансово-экономической безопасности предприятия [1, с. 23–29]. Золоотвалы теплоэлектростанций растут, поглощая все новые территории, в то время как лишь малая доля (15 %) годового объема золошлаковых отходов (ЗШО) используется повторно. Низкий процент утилизации во многом связан с качеством самих ЗШО. Существуют строгие нормативные требования к физико-химическим свойствам отходов, чтобы они могли применяться в производстве бетонов, цемента, строительстве дорог и других отраслях. Однако, не все золошлаковые отходы соответствуют этим стандартам, ограничивая их потенциал для вторичного использования [2]. Для получения устойчивых строительных материалов в последние годы были исследованы щелочно-активированные материалы, включая геополимеры, как альтернативу портландцементу [3]. Для оценки пригодности золошлаковых отходов при выполнении строительных работ необходимо учитывать химический состав, а также химические и физические свойства такого вида отходов [4; 5].

Химический состав золошлаковых отходов (ЗШО) Приморского края характеризуется значительной вариативностью, обусловленной особенностями месторождений угля, используемого на теплоэлектростанциях региона. Основными оксидами, определяющими химическую природу ЗШО, являются диоксид кремния (SiO_2), оксид алюминия (Al_2O_3) и оксид железа (Fe_2O_3). Содержание SiO_2 колеблется от 37 % до 66 %, Al_2O_3 – от 17,5 % до 27,5 %, тогда как концентрация Fe_2O_3 может достигать существенных значений [6]. Такая разница в составе оказывает прямое влияние на физико-механические свойства получаемых строительных материалов, включая геополимеры, где соотношение Si/Al играет ключевую роль для прочностных характеристик. Например, оптимальное значение этого соотношения для достижения максимальной прочности составляет 3,5–4,0, что способствует формированию большего числа связей – Si-O-Si-, обеспечивающих высокие механические показатели материала [7].

Вариативность химического состава ЗШО также зависит от происхождения угля, добываемого на различных месторождениях. Например, образцы из Райчихинского угольного месторождения содержат 37 % SiO_2 и 25 % Al_2O_3 , тогда как материалы из Артемовского месторождения демонстрируют более высокие значения – 56,7 % и 27,5 % соответственно [6].

Эти различия создают определенные сложности при применении ЗШО в качестве сырья для производства строительных материалов, требуя предварительного анализа и адаптации технологических процессов под конкретный тип отходов. Важно отметить, что помимо основных оксидов, в составе ЗШО выявлены микроэлементы, такие как бор, молибден, германий и уран, которые могут играть важную роль в специализированных применениях [8].

Существенное внимание уделяется содержанию редкоземельных элементов (РЗЭ) в золошлаковых отходах, что открывает перспективы для их дополнительной ценности. Исследования показывают наличие таких элементов, как скандий (Sc), иттрий (Y), лантан (La), церий (Ce) и неодим (Nd) с концентрацией, например, Sc на уровне 20,9 ppm и Ce – 82,51 ppm [9]. Извлечение этих компонентов возможно с использованием методов хи-

мической обработки, включая комбинацию азотной, соляной и плавиковой кислот, что обеспечивает степень извлечения более 70 %. Этот факт делает ЗШО не только источником сырья для строительных материалов, но и потенциальным ресурсом для добычи ценных металлов, усиливая экономическую привлекательность их переработки.

Кроме химического состава, размер частиц ЗШО является параметром, влияющим на реакционную способность и прочностные характеристики геополимерных материалов. Более мелкие частицы способствуют увеличению площади контакта между реагентами, что повышает скорость и эффективность геополимеризации. Исследования показали, что использование частиц размером менее 63 мкм значительно улучшает пуццолановую реактивность, что позволяет достичь прочности геополимерного бетона до 73 МПа при оптимальном соотношении $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, равном 15,9 [7, 10]. Однако крупные частицы имеют свою роль, особенно при создании композитных материалов, где они могут добавлять положительные эффекты, связанные с улучшением структурной целостности. Характеристики золошлаковых отходов Приморского края, включая их химический состав, содержание редкоземельных элементов и размер частиц, представляют собой комплексный фактор, определяющий их применимость в производстве геополимерных материалов.

Таким образом, выгода от использования золошлаковых отходов в производстве геополимеров очевидна. Во-первых, это снижение затрат на сырье. Стоимость золошлаковых отходов, как правило, значительно ниже стоимости традиционных цементных компонентов. Во-вторых, это сокращение расходов на утилизацию и хранение отходов, что является существенной статьей затрат для энергетических предприятий. В целом, ЗШО обладают значительным потенциалом для вторичного использования, но его реализация требует комплексного подхода, включающего научные исследования, технологические инновации и экономическое обоснование. Необходимость дальнейших исследований заключается в оптимизации технологий разделения и очистки отходов, а также в разработке инновационных методов извлечения ценных компонентов, таких как РЗЭ, для повышения экономической и экологической эффективности переработки.

Библиографический список

1. Финансовые аспекты обеспечения экономической безопасности: многоуровневый подход / Е. В. Левкина, Ж. И. Лялина, А. В. Локша [и др.]. Владивосток: ДВФУ, 2022. 169 с.
2. Кислицына Д. В., Королева Е. А. Анализ изменения химического состава золошлаковых отходов // Академическая публицистика. 2020. № 12. С. 59–67.
3. Durability of geopolymers with industrial waste / L. B. de Oliveira, M. T. Marvila, E. C. Pereira [et al.] // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol 16. e00839.
4. Слободчикова Н. А., Плюта К. В., Клюев С. В. Исследование свойств золошлаковых смесей тепловых электростанций с позиции их применения в дорожном строительстве // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11. № 3.
5. Оценка пригодности золошлаковых отходов для производства дорожно-строительных материалов / П. П. Панков, Н. Д. Шаванов, Д. В. Бесполитов [и др.] // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 5. С. 15–21.
6. Taskin A., Elkin O., Fedotov D. Market potential for industrial ash and slag waste in Primorsky Krai, Russia // E3S Web of Conferences: 2018 Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics, TPACEE 2018, Moscow, 03–05 декабря 2018 года. Vol. 91. Moscow: EDP Sciences, 2019. P. 04005. DOI 10.1051/e3sconf/20199104005.
7. Luhar, I. A Comprehensive Review on Fly Ash-Based Geopolymer / I. Luhar, S. Luhar // Journal of Composites Science. 2022. Vol. 6. No. 8. P. 219. DOI 10.3390/jcs6080219.
8. System of industrial waste accounting and recycling in Primorsky Territory, Russia in the context of European experience / V. I. Petukhov, O. I. Litvinets, A. V. Taskin [et al.] // International Journal of Environmental and Science Education. 2016. Vol. 11. No. 18. P. 12604–12612.
9. Слесаренко В. В., Таскин А. В. Технологические аспекты утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций // Евразийское Научное Объединение. 2015. Т. 1, № 2 (2). С. 60–62.
10. Органо-неорганические композиционные материалы на основе отходов горнорудных предприятий / П. П. Панков, Н. А. Коновалова, К. К. Размахнин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 2. С. 64–75.

© Козлов П. Г., Таскин А. В., Федюк Р. С., Алексеико Л. Н., Федотов Д. Р., 2025