

УДК 504.062.4

Стрельников К.Д., аспирант
Успенская М.В., доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(СПбПУ)

Strelnikov K.D., graduate student
Uspenskaya M.V., Doctor of Technical Sciences, Professor
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

ГЕОПОЛИМЕР НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

GEOPOLYMER BASED ON CONSTRUCTION WASTE

Загрязнение окружающей среды – это важная проблема мирового масштаба, которая оказывает воздействие на экосистему. Одной из главных задач в области охраны окружающей среды и сохранения геоэкологического баланса является организация утилизации отходов. Отходы строительной отрасли составляют существенную часть общего объёма отходов и могут быть опасны для природы и здоровья человека. Их образование приводит к серьёзному загрязнению воздуха, воды, растений и почвы.

Для повышения коэффициента комплексного использования промышленных твёрдых отходов, в рамках данной работы был рассмотрен мировой опыт получения геополимерных материалов с использованием строительных отходов, применяемых для стабилизации грунта при закладке выработанного пространства разрезов. Заброшенные карьеры, отвалы, деградированные почвы требуют эффективных методов восстановления.

Геополимеры – это инновационные строительные материалы, которые возможны к укреплению и стабилизации нарушенных покровов земли. Данные материалы могут применяться для формирования устойчивой основы при заполнении карьеров для последующего их озеленения. Преимущества использования геополимерных материалов заключаются, прежде всего, в придании ими высокой прочности, долговечности и возможности утилизации промышленных отходов в качестве сырья при решении экологических задач.

Геополимеры, получаемые щелочной активацией алюмосиликатного сырья природного и техногенного происхождения, представляют собой динамично развивающееся направление новых типов бесцементных гидравлических минеральных вяжущих. Данные материалы с высокими эксплуатационными свойствами, широкого спектра назначения, не

ограничивающимися растворами и бетонами, вызывают большой научный и практический интерес, активно разрабатываются и изучаются научными школами многих стран мира. [1-4]

Moreno-Maroto et al., Tan et al., Gu et al., Jiang et al., определили, что отходы строительной индустрии содержат большое количество SiO_2 , Al_2O_3 и CaO , что позволяет использовать их в качестве потенциального сырья для производства геополимеров. [5]

Исследования в данной области показали, что эффективность геополимерных материалов, полученных из отходов строительства и сноса, тесно связана с химическим составом, реакционной способностью и гранулометрическими характеристиками исходных материалов.

Гу и др. оценили влияние химического состава строительных отходов на механические свойства полученного геополимера и обнаружили, что геополимерные композиции на основе переработанного бетона имеют прочность на сжатие близкую к 30 МПа, что выше, чем у геополимера на основе керамики. Строительные отходы были разделены на три основных компонента, а именно на кирпич, керамику и бетон. Для оценки влияния химического состава и размера частиц исходных материалов на прочность материалов, полученных из отдельных и смешанных компонентов отходов, были проведены рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), рентгеноструктурный анализ (РСА), анализ размера частиц и испытания на прочность при сжатии в свободном состоянии. [6]

На прочность геополимера также влияют тип и дозировка щелочного активатора (Tchakouté et al., Kovtun et al., Helmy). Наиболее часто используемые щелочные активаторы – это раствор гидроксида натрия и раствор силиката натрия. Многие исследователи доказали, что использование смешанного щелочного активатора вместо однокомпонентного может значительно усилить эффект активации, повышающий прочность геополимера (Ma et al.).

Чрезмерно высокий или низкий модуль (молярное соотношение SiO_2 и Na_2O) и дозировка щелочных активаторов негативно влияют на процесс геополимеризации и ухудшают качество композита. Sivasakthi and Jeyalakshmi, Ouyang et al., Luukkonen et al. в своих исследованиях определили оптимальный модуль и дозировку щелочного активатора, при которых достигается максимальная прочность геополимера. [6]

Основная проблема геополимеров на основе переработанного бетона заключается в повышении их механической прочности. Это связано с низким содержанием аморфных веществ в переработанном бетоне, при этом большая часть Si, Al и Ca находится в форме кристаллических минералов. Эти минералы хуже растворяются в щелочных активаторах, что препятствует геополимеризации, приводит к уменьшению количества геля и снижению прочности. Хо и др. обнаружили, что из-за низкой

реакционной способности отходов бетона большинство кристаллических фаз остаются инертными и действуют как нереактивные наполнители.

В настоящее время для повышения реакционной способности исходных материалов в основном используются такие методы, как механическое измельчение, щелочная активация, термическая активация и добавление примесей. Исследования показывают, что исходные материалы с более мелкими частицами обладают более высокой реакционной способностью, что позволяет получать геополимеры с повышенной прочностью на сжатие.

Тан и др. продемонстрировали, что механическое измельчение может изменить размер частиц, кристаллическую структуру и поверхностные группы исходных материалов, повысив их реакционную способность. Длительное измельчение также повышает реакционную способность, но чрезмерная тонкость помола может привести к агрегации частиц, препятствующей дальнейшей реакции.

Некоторые исследователи обнаружили, что прокаливание может привести к разложению кристаллов алюмосиликатов, тем самым повышая их реакционную способность. Сюй и др. исследовали влияние механического измельчения и термической активации на реакционную способность и обнаружили, что комбинированный метод измельчения и термической активации обеспечивает наилучшее повышение реакционной способности.

Фэн и др. предложили метод термощелочной активации для повышения активности путём добавления гидроксида натрия (NaOH) во время прокаливания для получения более активных аморфных алюмосиликатов. Абдель-Гаввад и др. показали, что добавление карбоната натрия (Na_2CO_3) во время прокаливания способствует переходу некоторых кристаллических минералов в аморфное состояние. Однако температура и продолжительность прокаливания существенно влияют на образование стекловидных фаз: при чрезмерно высоких температурах или длительном прокаливании происходит спекание и снижается реакционная способность.

Завра и др. обнаружили, что добавление нановолокон TiO_2 ускоряет процесс геополимеризации, положительно влияя как на механические свойства, так и на микроструктуру геополимеров. [7]

Производство геополимерного композита на основе строительных отходов исключает процесс высокотемпературного обжига, что значительно снижает энергопотребление и выбросы углекислого газа (Амран и др., Конг и Чэнг).

Существующие исследования подтвердили, что геополимерный материал на основе отходов строительства является перспективным связующим веществом и зарекомендовал себя как экологичный материал для укрепления грунта.

Список литературы

1. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З., Стоянов О.В. Геополимеры // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №23. – С. 189-196
2. Ли Ц., Тан Г., Вэн Х., Ши Дж., Ли С. и Се Дж. Возможность использования геополимеров на основе FA и GGBS для стабилизации грунтов с высоким пределом текучести. – 2025. – Том 12. – С. 1-13 doi: 10.3389/fmats.2025.1643683 1-13
3. Ван С., Чжун Дж. и Сунь Ю. Инновационная стратегия уменьшения автогенной усадки в шлаке, активированном щелочью, с использованием губки из гидрофильных углеродных нанотрубок // Compos. Part B: Engineering. – 2025. – С. 299 doi:10.1016/j.compositesb.2025.112447
4. Хоссейн С. С. и Ахтар Ф. Последние достижения в области применения геополимеров для улавливания, хранения и преобразования углекислого газа // Journal of CO₂ Utilization – 2023 – С. 78 doi:10.1016/j.jcou.2023.102631
5. Се Цзяньвэй, Цзюньхуэй Чжан, Чжи Цао, Йохан Блом, Седрик Вуе, Фань Гу Возможность использования геополимера на основе строительных и демонтажных отходов для стабилизации грунта под фундаментом // Journal of Clean Production. – 2024. – Том 450
6. Гу Фань, Цзяньвэй Се, Седрик Вуйе, Цзюньхуэй Чжан Синтез геополимера с использованием щелочной активации строительных отходов и отходов сноса зданий // Journal of Clean Production. – 2023. – Том 420
- 7 Се Цзяньвэй, Чэньчэн Ли, Боюй Ли, Цзяцзе Тан, Фань Гу Термически-щелочная активация улучшает механические свойства геополимеров на основе переработанного бетона с низким уровнем активности // Constr. Build. Mater. – 2025. – Том 463

References

1. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Stoyanov O.V. Geopolymers // Bulletin of Kazan Technological University. – 2014. – №23. – P. 189-196
2. Li C, Tan G, Weng H, Shi J, Li S and Xie J Feasibility of using FA and GGBS-derived geopolymer for high liquid limit soil stabilization // Front. Mater. – 2025 – Volume 12. – P. 1-13 doi: 10.3389/fmats.2025.1643683
3. Wang X., Zhong J., and Sun Y. Innovative strategy to reduce autogenous shrinkage in alkali-activated slag using hydrophilic carbon nanotube sponge // Compos. Part B Eng. – 2025. – 299 doi:10.1016/j.compositesb.2025.112447

4. Hossain S.S., and Akhtar F. Recent progress of geopolymers for carbon dioxide capture, storage and conversion // J. CO₂ Util. – 2023. – 78 doi:10.1016/j.jcou.2023.102631

5. Xie J., Zhang J., Cao Z., Blom J., Vuye C., and Gu F. Feasibility of using building-related construction and demolition waste-derived geopolymer for subgrade soil stabilization // J. Clean. Prod. – 2024 – 450 doi:10.1016/j.jclepro.2024.142001

6. Gu F., Xie J., Vuye C., Wu Y., and Zhang J. Synthesis of geopolymer using alkaline activation of building-related construction and demolition wastes // J. Clean. Prod. – 2023. – 420 doi:10.1016/j.jclepro.2023.138335

7. Xie J., Li C., Li B., Tang J., and Gu F. (2025). Thermal-alkaline activation enhances the mechanical properties of low-activity recycled concrete powder-derived geopolymers // Constr. Build. Mater. – 2025 – 463. doi:10.1016/j.conbuildmat.2025.140020