

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-22

*Кожухова Н.И.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Московский политехнический университет**E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru*

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА ЯЧЕЙСТЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ

Аннотация. Геополимерные системы в настоящее время являются довольно перспективным направлением среди ученых строительного материаловедения в аспекте бесцементных энергоэффективных вяжущих и материалов атермального синтеза благодаря широкому перечню их положительных свойств, вполне конкурирующих с традиционными аналогами типа цемента и цементобетона. В статье произведен литературный обзор имеющегося на сегодняшний день исследовательского и практического опыта среди отечественных и зарубежных ученых по вопросу синтеза ячеистых бетонов на основе геополимерных вяжущих. На основании проведенного обзорного анализа современных публикаций по данной тематике за последние 20–25 лет было показано, что ключевыми параметрами, которые оказывают доминирующее влияние на формирование качественной поровой структуры, а также теплофизических и механических свойств ячеистого геополимербетона являются: выбор и подготовка основного сырья с учетом его химической природы и микроструктуры системы; вид модифицирующего и поробразующего компонента; последовательность введения компонентов; условия и режим твердения; технология порообразования и т.д. В результате аналитического исследования также было выявлено, что, несмотря на довольно большое количество трудов, посвященных получению ячеистых геополимерных систем, в целом, на сегодняшний день отсутствует глубокое понимание принципов формирования и особенностей поведения поровой структуры в эксплуатационный период геополимеров.

Ключевые слова: геополимер, ячеистый бетон, поровая структура, способы синтеза, эксплуатационные свойства.

Введение. Принято считать, что для производства материалов строительного назначения в больших объемах наиболее целесообразно применение энергосберегающих технологий, например, использующих температуру окружающей среды или незначительно повышенную температуру, что обеспечивает получаемой продукции более высокую экономическую и экологическую эффективность и рентабельность, а, следовательно, более высокую привлекательность для промышленной индустрии [1, 2]. С другой стороны, тенденции к реализации энергосберегающих технологий могут быть достигнуты не только в процессе получения композитов по технологиям так называемого атермального синтеза, но и за счет использования материалов, обеспечивающих энергоэффективную эксплуатацию зданий и сооружений, созданных с их применением. К таковым относятся материалы и композиты с высокопористой ячеистой структурой.

Научный интерес к ячеистым материалам обусловлен широким спектром потенциальных сфер применения [3, 4]. Необходимыми свойствами для высокопористых материалов являются, например, низкая объемная плотность, высокая проницаемость [5], высокая удельная поверхность, низкие показатели теплопроводности

[6] и/или эффективная комбинация этих параметров, с учетом требований в реалиях промышленного применения. Каждая из выше перечисленных характеристик тесно связана и напрямую воздействует на формирование микроструктуры затвердевшего порового каркаса, влияет на его химическую природу [7], а также характер пористости. Принято считать, что структура с точки зрения морфологии [8], объемной концентрации пор и источника происхождения газообразной субстанции, заполняющей поровое пространство, оказывают доминирующее влияние на эффективность получаемого ячеистого композита. Как следствие, ключевым фактором при формировании требуемых свойств ячеистого материала является эффективный подбор сырьевых компонентов и способа их обработки в процессе подготовки сырья и, непосредственно, синтеза самого материала.

Своей актуальностью в перечне ячеистых материалов отличаются легковесные композиты на основе геополимерного вяжущего: ячеистые геополимербетоны и, в частности, газо- и пенобетоны [1, 9–11], которые находятся в соответствии с современными мировыми тенденциями развития строительного рынка, и ориентированы не только на достижение энергоэффективности в

строительной отрасли, но также на снижение негативного воздействия на окружающую среду, сокращению выбросов углекислого газа и уменьшению истощения природных ресурсов. Благодаря особенностям технологии и химии синтеза, геополимерные материалы и изделия обладают весьма хорошей перспективой для дальнейшего развития и практического применения различной целевой направленности.

В рамках этого исследования был проведен литературный обзор по различным технологиям получения геополимерных вяжущих и ячеистых

геополимеров на основе широкого спектра алюмосиликатного сырья. В настоящее время большое количество зарубежных ученых и исследователей по всему миру [1, 12–15] работают над вопросом создания геополимеров и ячеистых бетонов на их основе (рис. 1).

Целью настоящего исследования является изучение и анализ отечественного и зарубежного опыта научных изысканий и применения на практике теоретических результатов по вопросу особенностей синтеза ячеистых геополимербетонов и их основных эксплуатационных характеристик.



Рис. 1. Научные центры, занимающиеся изучением и производством геополимеров и ячеистых бетонов на их основе (отмечены красными точками на карте)

Методология. Объектом исследования являются ячеистые бетоны на основе геополимерных вяжущих систем различного компонентного состава и разных технологий производства. Методом обзорного анализа и оценки отечественных и зарубежных опубликованных научных исследований выявлены особенности подбора сырьевых материалов и технологических режимов, обеспечивающих эффективность формирования ячеистой структуры геополимерной матрицы. Произведена сравнительная оценка некоторых методов получения ячеистых геополимербетонов.

Основная часть. Как правило, условия твердения, используемые при синтезе геополимеров и материалов на их основе, включают консолидацию матрицы в условиях атмосферного давления и в температурном диапазоне от 25 °С до 150 °С [16]. Однако этот диапазон параметров является весьма обобщенным, поскольку, в силу

широкого разброса свойств потенциального сырья для геополимеров, условия процесса синтеза подбираются индивидуально.

Так, например, исследования [17] геополимерной смеси на основе метакрилата, твердеющей в температурном диапазоне 10–80 °С в течение 1–4 ч показали, что повышенная температура ускоряет набор прочности, однако, конечная прочность после 28 суток ниже, чем в аналогичных смесях, которые твердеют при комнатной температуре. Данное явление объясняется наличием у метакрилата замедленной реакционной способностью при повышенных температурах. Таким образом, проявляется низкая степень полноты протекания реакции геополимеризации, демонстрирующая кинетику и характер изменения системы в процессе структурообразования [18].

С другой стороны, для геополимеров на основе золы-уноса из-за более низкой реакционной способности золы-уноса, твердение при повышенной температуре в данном случае более предпочтительно по сравнению с метакрилатом [19].

Аналогичная тенденция характерна для геополимеров как с плотной, так и с ячеистой структурой.

Так, в некоторых исследованиях установлен положительный эффект высокотемпературного воздействия на эксплуатационные характеристики ячеистого геополимера [20]. Например, Fletcher R.A., MacKenzie K.J.D. [21] установили, что после обжига «спеченный» ячеистый геополимерный бетон имеет сравнительно однородную структуру, равномерное распределение пор и пустот, а также высокое соотношение прочности и плотности. В связи с этим, наиболее целесообразно рассматривать его, как пористую керамику, а не как бетон. Он подходит для использования в качестве строительного материала для замены существующих видов керамической плитки, глиняного кирпича и строительных блоков.

Говоря о керамике, ближайшим аналогом для геополимера с идентичным механизмом структурообразования (полимеризация) следует отметить наноструктурированное вяжущее. В работе авторов [22] был получен пенобетон на основе перлитового наноструктурированного вяжущего со следующими эксплуатационными параметрами: классом по прочности B1,5–B2,5, маркой по плотности D300–D500, соответственно и коэффициентом теплопроводности в диапазоне от 0,08 до 0,1 Вт/(м·°C).

Наибольший интерес в русле исследования ячеистых геополимербетонов представляют работы по применению золы-уноса [23–25].

Sanjayan J., Nazari A. и другие [26] предложили стандартный подход для синтеза газобетона на основе золы-уноса, используя алюминиевую пудру в качестве газообразователя. Показатели прочности на сжатие для полученных пористых образцов колеблются в пределах 0,9–4,35 МПа, что позволяет использовать этот газобетон для производства кирпича, огнестойких панелей, подземных трубопроводов и т.д.

Имеется ряд работ, подтверждающих возможность использования метакаолина при создании ячеистого геополимерного бетона [27, 28].

Так, в 2012 году, в Китае были запатентованы изделия из ячеистого геополимера на основе метакаолина [29], которые обеспечивают пористость от 35 до 80 %, предел прочности при сжатии от 1,7 до 10,9 МПа при соответствующей плотности от 300 до 1240 кг/м³. Для газообразования в материале используется алюминиевая паста. Твердение происходит при температуре в диапазоне 40–100 °C в течении 4–8 часов. Данный ячеистый геополимер может быть использован в теплоизоляционных, звукоизоляционных, мембранных материалах, а также в материалах, поглощающих отходящие газы, энергию и т. д.

Однако негативной особенностью ячеистых геополимеров на основе метакаолина является повышенная усадка при воздействии температуры в условиях сушки или при нагреве, вызывающих микро- и макроскопические растрескивания в структуре. С целью повышения эффективности их применения для возможности получения огнеупорных композитов, ученые Zhang Z., Provis J. и другие в работе [1] разработали два типа ячеистых геополимеров, используя H₂O₂ и Al-пудру, в качестве газообразующих агентов. Твердение образцов осуществлялось при 200 °C, при постепенном повышении давления от 1,5–4 МПа до 12 МПа. Результаты показали, что использование H₂O₂ обеспечивает высокую прочность на сжатие (44–77 МПа). Однако, получаемый газобетон не устойчив к растрескиванию при высокотемпературном воздействии (1200 °C в течение 3 ч). В то же время, образцы с использованием Al-пудры устойчивы к трещинообразованию при повышенных температурах.

Несколько иные подходы при создании данных ячеистых геополимерных материалов были предложены учеными с использованием различных отходов промышленности, таких как доменный шлак, рисовая шелуха, металлургические и стекольные отходы [30–33].

В Национальном университете Чуннам (Южная Корея) [34] для получения ячеистого геополимерного бетона в качестве экологичного материала при возведении морских ферм используют побочные продукты сталелитейной промышленности. Экспериментальные результаты показали довольно высокую прочность образцов – до 11,9 МПа при пористости 25 %. Порообразование происходит в результате вспенивания гранулированных удобрений и шлака при особом режиме перемешивания.

Для создания пористых геополимеров учеными из университета Лиможа (Франция) [33] использовалась композиция из метакаолина, затворяемого раствором силиката и гидроксида калия. Добавление микрокремнезема как порообразующего агента способствует формированию неорганической пены. Свободные атомы кремния, содержащиеся в микрокремнеземе, реагируют с щелочным раствором с образованием молекул водорода в рабочей среде, повышенной основности.

Zhao Y., Ye J., Lu X. и другие [35] из Даляньского технологического университета (Китай) синтезировали геополимерный пенобетон с использованием золы-уноса и порошка от листового стекла, в качестве твердофазных компонентов. В качестве пенообразователя использовалось соединение додецилбензолсульфоната

натрия и растительный белок – глютен. Основные этапы синтеза этого пенобетона включают такие переделы как подготовка пеномассы, формование и сушка при температуре 105 °С в течение 12 ч, затем спекание при 1050 °С в течение 2 ч. Внешний вид и структура пор полученного геополимерного композита показаны на рисунке 2. Пористая структура кажется однородной в

миллиметровом диапазоне. В дополнение к фазам кварца и муллита, анортит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) образуется после спекания. Считается, что данный минерал является главной причиной обеспечения высокой прочности. Данный образец был синтезирован с содержанием 13 % порообразователя по массе сухого материала, и показал прочность на сжатие до 6,76 МПа и среднюю плотность – 0,414 г/см³.

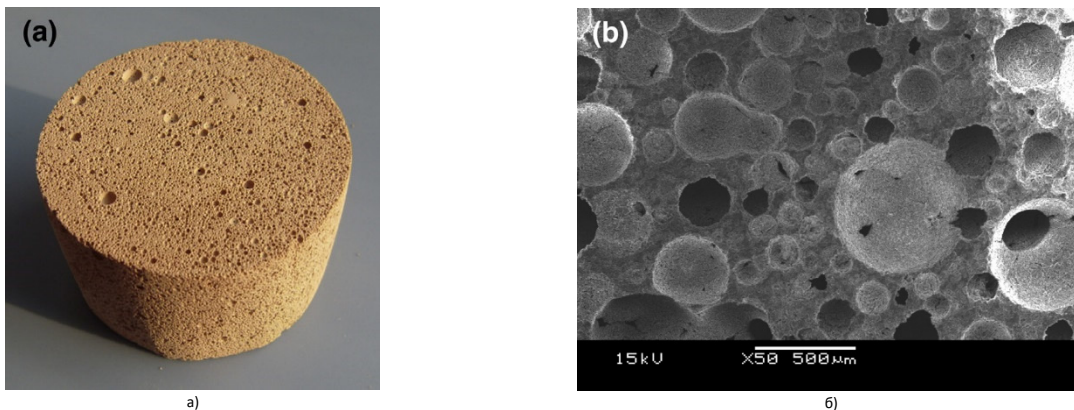


Рис. 2. Макро- (а) и микроструктура (б) «спекенного» геополимербетона [35]

На основании литературных данных [36, 37] ячеистые геополимербетоны также могут быть синтезированы с использованием пенополистирола и талька.

Шлаки и золы-уноса могут быть использованы для производства пеностекла, которое, с учетом используемых сырьевых компонентов, можно считать разновидностью ячеистого геополимера.

Еще один вариант ячеистого геополимера – пеностекло на основе зол-уноса. Пеностекло представляет собой материал, который вызывает к себе большой интерес и применяется во многих областях, таких как строительство, химическая и оборонная промышленность, что обусловлено

комплексными свойствами данного материала, такими как, негорючесть, низкие показатели теплопроводности, плотности и др.

Ul Haq E. и Licciulli A. [25] изучали использование золы-уноса для синтеза пеностекла с использованием различных пенообразователей. Данный метод имеет недостаток в виде образования токсичных газов при удалении порообразователя термообработкой.

Профессор Kamseu E. из итальянского университета в своей работе [38] также разработал метод получения пеноматериалов на основе геополимеров с использованием метакаолина и Al-пудры с соотношением жидкой фазы и метакаолина в соотношении 1:1,6 (рис. 3).

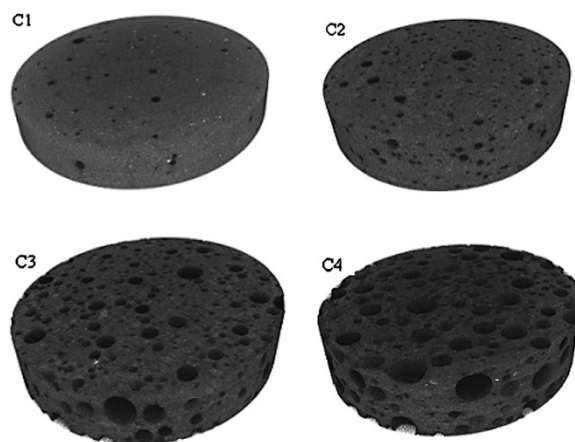


Рис. 3. Геополимеры, вспененные с различным содержанием Al-пудры: образцы C1, C2, C3 и C4 содержат 5, 10, 15 и 20 мг Al-пудры, соответственно [38]

Пористость такого материала составляет от 30 до 70 %. Для достижения гомогенной пористой структуры, необходимо высокое соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1,79$. Пеноматериалы в этом случае обладают гораздо меньшей теплопроводностью (0,15–0,4 Вт/м·К), чем плотные геополимеры (0,6 Вт/м·К) при равных условиях твердения (комнатная температура).

В докладе китайских исследователей Zhang Z., Wang H. и других, представленном на 21-й Австралоазиатской конференции, отображен метод механического предварительного вспенивания для получения пенобетона на основе кислой золы-уноса (содержание CaO в составе золы-уноса – 2,6 масс. %) [39]. На рисунке 4 показан образец этого пенобетона и его микроструктура. Размер пустот, в основном, колеблется в пределах 50–400 мкм со средним коэффициентом

округленности 0,6. Материал имеет плотность 850–950 кг/м³ при прочности на сжатие 4–9 МПа в зависимости от типа щелочного активатора.

Профессор Al Bakri Abdullah M.M. [11] из университета Перлис (Малайзия) получил геополимерный пенобетон с использованием высококальциевой золы-уноса (содержание CaO в составе золы-уноса – 21,6 %), путем смешивания пены с геополимерной смесью в объемном соотношении 2:1. При этом твердение осуществлялось в двух различных условиях: комнатная температура и тепловая сушка при 60 °С в течении 24 ч с последующим твердением в нормальных условиях. При тепловой сушке изделия продемонстрировали более высокие показатели пористости, но, при этом, довольно высокие значения плотности по сравнению с аналогами без термообработки.

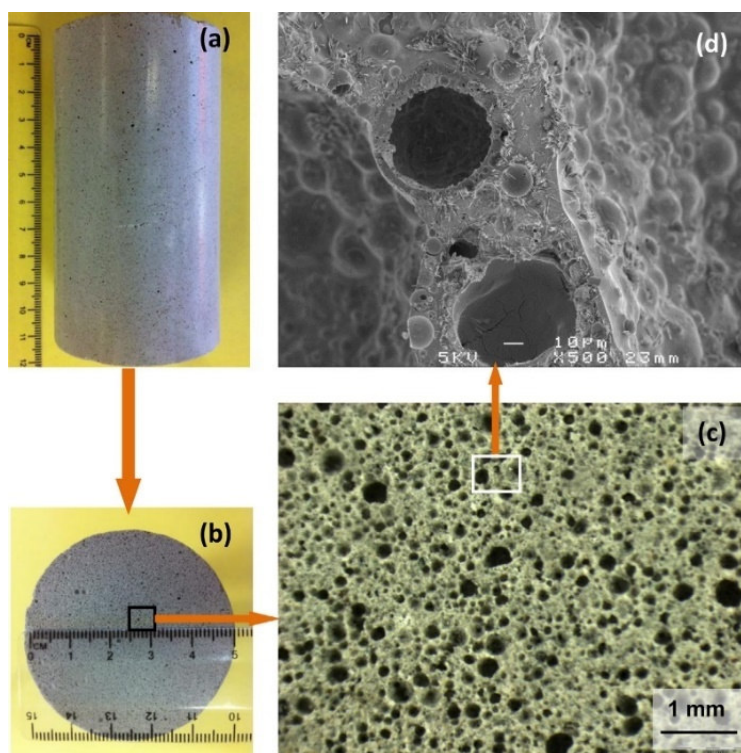


Рис. 4. Геополимерный пенобетон с использованием основной золы-уноса [11]

Рассматривая различия между плотными и ячеистыми геополимерами, необходимо отметить, что такие химико-технологические параметры как особенности порообразующих агентов, способы их введения в геополимерную систему, а также влияние на поро- и фазообразование в вяжущей системе, в том числе, под действием высоких температур, слабо изучены [40, 41]. В настоящее время алюминиевая пудра широко используется для образования пор в газобетоне на основе цемента, в то время как использование ее для газобетона в геополимерных системах носит экспериментальный характер. Уста-

новлено, что дозировка, реакционная способность (в том числе степень дисперсности) и диссоциация Al-пудры оказывает влияние на формирование поровой структуры геополимерных систем на атомном и наноструктурном уровнях [38, 42].

Турецкими исследователями [43] было выявлено, что количество пены с использованием органического пенообразователя при смешивании с геополимерным вяжущим, требуется в большом объеме, а поры, из-за высокой вязкости пасты, как правило, разрушаются в процессе смешивания.

С точки зрения микроструктуры, разница между плотными и ячеистыми геополимерами также существенна. В целом, разработка геополимерного пенобетона является относительно новой областью строительного материаловедения, поскольку объем данных о взаимосвязи между составом, структурой и свойствами этих материалов незначителен [1].

Теоретический анализ литературы показывает, что проблема получения пористых геополимерных материалов рассматривается достаточно широко (табл. 1).

Следует отметить, что большое количество исследований также посвящены вопросу порообразования и формированию пористости в геополимерном бетоне [23, 33, 36], а также условиям твердения пористой вяжущей системы [25, 32, 44].

Таблица 1

Зарубежный опыт получения ячеистого геополимерного бетона

Сырье	Порообразователь	Активатор	Условия твердения	Источник
Зола-уноса	Na_2SiO_3	NaOH	СВЧ-нагрев при 100 °С	[25]
Перлит	H_2O_2	NaOH	2ч при 35 °С (пластик. форма) + 24ч при 65 °С	[44]
Зола-уноса + метакаолин	Al-пудра	Na_2SiO_3	24 ч при 25 и 70 °С	[28]
Доменный шлак	Al-пудра (0,06 %) + лаурилсульфат натрия (0,04 %)	Na_2SiO_3	2ч при 25 °С, нагрев до 87 °С за 3ч, выдержка 6ч, охлаждение 3ч	[32]
Зола-уноса	Al-пудра (5 %)	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$	24ч при н.у. (пластик. форма) + 24ч при 60 °С	[23]
Зола-уноса	Al-пудра + Перекись водорода (H_2O_2)	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$	24ч при 60 °С, нагрев в 3ч до 1000 °С	[24]
Метакаолин	Al-пудра (0,20 %)	Фосфорная кислота	5ч при 80 °С	[27]
ПЦ – 516 кг/м ³ , отходы стекла – 129 кг/м ³ , микрокремнезем – 64 кг/м ³	Синтетический ПАВ	Вода – В/Ц=0,4 ПАВ, пластиф. Sika ViscoCrete D 132-2	24 ч при н.у. (полиэтилен. форма) + в воде при 20±2 °С и влажности 95%	[30]
Гранулы калия + Метакаолин	Na_2SiO_3 + микрокремнезем	$\text{KOH} + \text{K}_2\text{SiO}_3$	0,3ч при 70 °С + 1,5ч при 50 °С + 12ч при 25 °С	[33]
Металлургические отходы (шлак)	Гранулированные удобрения	Вода	24ч при н.у. + при 20±2 °С	[34]
Каолин (10 %) + Тальк (90 %)	Отходы технической резины	Вода	48ч (25 °С), нагрев (300 °С), спекание 900, 1220 °С	[36]
Зола рисовой шелухи и метакаолин (2,5:1)	Al-пудра	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$	24ч 20±2 °С + 48ч 30 °С	[31]

Пористость ячеистого геополимербетона.

В исследовании Sanjayan, J., Nazari, A. и других [23] изучены особенности формирования поровой структуры и ее влияния на свойства образцов ячеистого геополимербетона на основе золы-уноса и смеси щелочных компонентов « Na_2SiO_3 – NaOH ». В качестве порообразующего агента использовалась алюминиевая пудра. Благодаря активной химической реакции между алюминиевым порообразователем и щелочным активатором в геополимерной системе формируется преимущественно высокопористая структура. Анализ экспериментальных данных показал, что введение до 5 % алюминиевой пудры как порообразующего компонента при следующем соотношении сырьевых компонентов: щелочной активатор / зола-уноса – 0,3; Na_2SiO_3 / NaOH – 2,5, обеспечивает формирование наибольшей пористости и,

как следствие, наименьшей плотности наилучшего вспененного образца. При этом, показатели прочности на сжатие для всей линейки экспериментальных образцов ячеистого геополимера находились в пределах 0,9–4,35 МПа.

Однако авторами было отмечено, что высокая концентрация этого порообразователя инициирует чрезмерно интенсивное протекание реакции, что, в свою очередь, препятствует полной щелочной активации алюмосиликатной составляющей в геополимерной матрице и, следовательно, геополимеризация протекает частично.

В работе Henon J., Alzina A. и Rossignol S. [33] доказана возможность регулирования температурным воздействием таких параметров поровой геополимерной структуры как размер и морфология пор, а также степень их гомогенного

распределения в объеме ячеистой матрицы. Исследования проводились на образцах геополимерных пен, полученных путем смешения метаксаолина и микрокремнезема, активированных смесью из щелочных компонентов «силикат калия – гидроксид калия». Микрокремнезем был использован в геополимерной системе в качестве порообразующей добавки до 50 % от общей массы алюмосиликатной твердой фазы. Порообразующий эффект микрокремнеземной добавки заключается в том, что имеющиеся свободные атомы кремния в составе микрокремнезема окисляются под действием щелочного раствора, высвобождая молекулярный водород, который инициирует процесс порообразования и формирует поровую структуру. На основании проведенных исследований было установлено, что даже низкотемпературная обработка (в диапазоне 25–70 °С) способна инициировать эффективное порообразование. При этом, отмечено, что за счет циклического температурного воздействия возможно регулировать гранулометрию пор. В результате, синтезируемые таким образом геополимерные пены, характеризуются следующими теплофизическими характеристиками: размер пор – от 0,5 до 1,6 мм; коэффициент теплопроводности – от 0,12 Вт/м·К при пористости структуры 65–85 % и средней плотности 0,4–0,85 г/см³.

Исследованиями [25] рассмотрена гипотеза и доказана возможность обеспечения поровой структуры геополимера, а также регулирования степени ее пористости без введения дополнительных порообразующих агентов, с применением только алюмосиликатной матрицы и щелочного активатора. Для формирования поровой структуры изготавливаются шарообразные агрегаты, состоящие из силиката натрия и золауноса, которые под действием микроволнового излучения при температуре 220 °С в микроволновой печи претерпевают одновременное вспучивание и процесс геополимеризации с последующим спеканием агрегатов в ячеистый монолит.

Российскими исследователями Богомазовой Е.В., Калиниченко В.В., Костюковым Н.С. и другими [36] предложен метод синтеза пористой керамики, как ближайшего аналога геополимерных систем, на основе каолина, талька и кварц-полевошпатового сырья, где в качестве порообразующей добавки авторами были рассмотрены отходы резино-механического производства, зерновых культур и деревообработки. Метод поризации в данном случае заключается в формовании образцов путем прессования сырьевой смеси под давлением 3 МПа, с последующей сушкой при комнатной температуре и влажности в течение 48 часов и дальнейшим обжигом в муфельной печи в

температурном диапазоне от 330 до 1220 °С. Обожженные образцы охлаждались в печи до комнатной температуры. Таким образом, формирование поровой структуры данным методом осуществляется за счет выгорания органического наполнителя в процессе обжига геополимерных образцов.

Недостатком данного метода является наличие усадки получаемых ячеистых композитов, которая составляет 20 % – в образцах с зерновыми отходами, 14 % – с резиновой крошкой и 5 % – с отходами деревообработки.

Авторами Kіouрis, D., Skaropoulou A. и другими в работе [45] поровая структура ячеистых геополимеров обеспечивалась за счет введения в вяжущую матрицу заранее пористого заполнителя в виде вспененного полистирола и вспученного перлита. Однако результаты исследований показали, что введение в состав геополимерной матрицы выбранных легких заполнителей приводит к снижению прочности на сжатие и изгиб для геополимерных образцов на 77 и 35 %, соответственно. Тем не менее, подобный состав и способ поризации структуры позволил авторам синтезировать легковесные геополимерные композиты с плотностью в диапазоне 1,0–1,6 г/см³, прочностью на сжатие 10–33 МПа, на изгиб 1,8–6,3 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,29–0,42 Вт/м·К, а также сорбционной способностью 0,031–0,056 мм/ч.

Ouda S. A., Rashad L. A. [46] использовали легкий керамзитовый щебень в качестве пористого заполнителя в ячеистый геополимербетон, где в качестве связующей матрицы использовался металлургический шлак, активированный раствором силиката натрия.

Легкий керамзитобетон представляет собой искусственный заполнитель, полученный в результате вспучивания глины и ее увеличения таким образом в объеме до 6 раз в процессе ее обжига при температуре около 1150 °С во вращающейся печи. Однако в результате исследований авторами было выявлено, что использование керамзитобетона в геополимерной системе в качестве заполнителя оказывает негативное влияние на показатели компрессионной прочности и водопоглощения. Но, при этом был отмечен положительный эффект данного заполнителя на теплопроводность, удобоукладываемость и относительную прочность после повышенного температурного воздействия.

Ранее автором статьи [47] было изучено влияние порообразователей различной природы на эффективность формирования поровой структуры в геополимерной высокощелочной среде. Экспериментальные результаты показали, что

синтетический пенообразователь в высокощелочной среде не способен формировать высокопористую структуру, в то время как применение порообразователя белкового происхождения работает более эффективно (с обеспечением кратности пены до 10).

Условия твердения.

В работе коллектива авторов [24] предложена методика отверждения геополимерного вяжущего следующего компонентного состава: зола-уноса – в качестве основного алюмосиликатного компонента, активированная смесью из гидроксида натрия и силиката натрия, используемых как щелочные компоненты. В качестве порообразующего агента в данной работе применялась смесь из алюминиевой пудры и перекиси водорода (H_2O_2). Предложенная методика предусматривает синтез ячеистого геополимера в следующей последовательности: в полученную после равномерного смешения компонентов, геополимерную суспензию вводилась смесь из порообразующих агентов. Далее, полученная суспензия была заформована в металлические формы. Дальнейшее твердение образцов осуществлялось по следующему температурному режиму: выдержка в естественных лабораторных условиях в течение нескольких часов → выдержка в сушильном шкафу при температуре $60\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 24 часов → расформовка и охлаждение образцов до естественной температуры → прокалывание в муфельной печи в течение 3 часов до температур в диапазоне от $600\text{ }^\circ\text{C}$ до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ → охлаждение образцов в муфельной печи до естественной температуры со скоростью охлаждения $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Результаты испытаний образцов показали, что высокотемпературное воздействие способствует увеличению

прочности пористых геополимеров примерно в два раза (до 42 МПа).

В работе итальянских исследователей Ul Naq, E. and Licciulli, A. [25] из университета Саленто применяется микроволновый синтез для вспенивания геополимерной массы с использованием золы-уноса и компонентов силиката натрия и гидроксида натрия – в качестве щелочных активизирующих агентов. Изменяя содержание соотношения золы-уноса и щелочного активатора (преимущественно, силиката натрия), можно моделировать физические и механические свойства теплоизоляционных кирпичей. Микроволновый синтез позволяет получать пенобетон с низкой плотностью (до $610\text{ кг}/\text{м}^3$) и теплопроводностью ($\approx 0,075\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), а также высокой пористостью и прочностью на сжатие – 72% и $3,55\text{ МПа}$, соответственно.

Как показывают данные литературных источников, опыт применения ячеистых геополимербетонных конструкций на сегодняшний день не ограничивается только научными исследованиями, но и имеет примеры эффективного применения в строительной практике.

Так, в Австралии в 2013 году при университете Квинсленда был построен Научно-исследовательский Институт Глобальных Изменений (GCI), который является первым зданием в мире, где успешно были применены материалы и конструкции из ячеистого геополимербетона (рис. 5) [48]. Институт Глобальных Изменений Квинсленда представляет собой четырехэтажное здание, полы которого изготовлены из конструкционного геополимерного бетона. Плиты состоят из геополимерной матрицы на основе шлака и золы-уноса.



Рис. 5. Первое здание из геополимербетона на основе золы-уноса, Университет Квинсленда, Австралия

Для этого здания Австралийская строительная компания HySSIL разработала сборные ячеистые геополимерные панели также на основе золы-уноса и доменного шлака, которые вполнину легче обычных цементобетонных панелей, с аналогичной прочностью и долговечностью (рис. 6).

Технические характеристики панелей HySSIL подходят для широкого спектра областей применения, включая использование в модульных конструкциях малоэтажного жилья [49].

Пористая геополимерная панель имеет ряд преимуществ по сравнению с панелью HySSIL на основе цемента, таких как:

- предел прочности при сжатии и изгибе на 15 % выше, чем у панелей на основе цемента, при плотностях от 1000 кг/м^3 и 1500 кг/м^3 ;
- более быстрое время твердения, позволяющее повторно использовать опалубку и сократить производственные затраты;
- более высокая химическая резистивность и огнестойкость;

– энергетические затраты на производство ниже примерно на 60 %.

Нельзя не отметить интерес к ячеистому геополимерному бетону и в других развитых странах. Так в 2014 году в США получен патент US20140264140A1 [51] на высокопрочный композиционный геополимерный пористый бетон. Бетон проектировался на основе низкокальциевой золы-уноса или золы-уноса класса F (содержание оксида CaO менее 20 %, согласно ASTM C618-19 [50]) и имел прочность на сжатие от 3 до 17 МПа при соответствующей средней плотности от 400 до 1200 кг/м^3 (рис. 7). Необходимо отметить комплексный состав этого ячеистого бетона, включающий различные добавки, суперпластификаторы, модификаторы, а также легкие наполнители. Для порообразования использовалось сочетание алюминиевой пудры и перекиси водорода H_2O_2 . Данный материал может быть применен как конструкционный, так и теплоизоляционный.



Рис. 6. Сборная панель строительной компании HySSIL из геополимерного ячеистого бетона на основе золы-уноса и шлака [49]

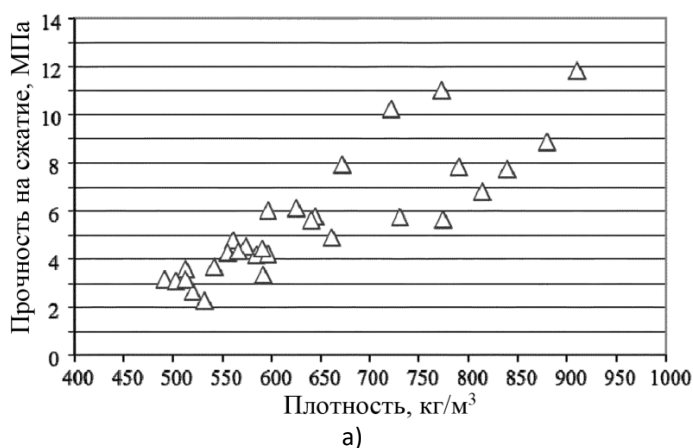


Рис. 7. Композиционный геополимерный пористый бетон:
а) – показатели прочности на сжатие и плотности материала,
б) – внешний вид образцов ячеистого геополимербетона [51]

Кроме того, ячеистые геополимерные материалы нашли широкое практическое применение для фильтрации, очистки, создания акустических материалов и конструкций линий электропередач. Как правило, такие геополимеры изготавливаются спеканием при 1000 °С [52, 53].

В последнее время ячеистый геополимер также расширил области своего применения благодаря низкой стоимости, простоты технологии производства, кислотостойкости, высоким теплофизическим свойствам и экологичности [27].

Вывод. Таким образом, обзорный анализ показал, что ячеистый геополимербетон является строительным материалом, имеющим большой рынок сбыта. Фактором, определяющим область его применения и востребованность, является низкая плотность и, как следствие, высокие теплотехнические характеристики при достаточной прочности и высокой эксплуатационной экологичности (в отличие от материалов на полимерной основе, таких как пенополистирол). Замена цемента на геополимерное вяжущее при обеспечении достаточной экономичности и повышении экологичности производства путем использования вяжущего атермального синтеза, позволит расширить спектр применяемого сырья и укрепить позиции ячеистого бетона как современного энергоэффективного строительного материала.

Однако, несмотря на проведенный широкий спектр исследований по разным аспектам, касающимся производства ячеистых геополимеров, применение этих материалов в настоящий момент не является широко распространенным по техническим и другим причинам.

Анализируя проблемы, связанные с производством ячеистого геополимерного бетона, нельзя не подчеркнуть, что отсутствие глубокого понимания представлений о фазовых и микроструктурных особенностях в ячеистой геополимерной структуре является ключевым фактором, определяющим такие технологические факторы производственного процесса как, выбор и подготовка сырья с учетом его химической природы и микроструктуры системы; последовательность введения компонентов; условия и режим твердения; а также контроль технологических свойств, которые способствуют усовершенствованию и эффективному применению геополимерных материалов. Поскольку в настоящее время в литературе отсутствует достаточное количество информации, обеспечивающей глубокое понимание формирования и особенностей поровой структуры в геополимерных системах, проведение исследований в данном направлении является весьма актуальным и требует более глубокого изучения.

Источник финансирования. Исследования выполнены в рамках реализации нацпроекта «Наука и университеты», научная тема «Создание лаборатории качества среды обитания человека и энергоэффективности городского хозяйства (FZRR-2022-0007)», рег. номер 1022072100016-6-2.1.3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang Z., Provis J., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
2. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Новиков М.В. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 20–24.
3. Ishizaki K., Komarneni S., Nauko M. *Porous Materials: Process Technology and Applications*. London: Kluwer. 1998. 240 p.
4. Luyten J., Mullens S., Snijkers F., Buekenhoudt A. Global Roadmap for Ceramics-ICC2 // *Proceedings, ISTECCNR. PoreArchitecture for a Vast Range of Applications*. Verona. 2008. Pp. 309–316.
5. Innocentini M.D.M., Sepulveda P., Salvini V.R., Pandolfelli V.C., Coury J.R. Permeability and structure of cellular ceramics: a comparison between two preparation techniques // *Journal of the American Ceramic Society*. 2005. Vol. 81(12). Pp. 3349–3352. doi: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02782.x.
6. Bourret E., Prud'homme S., Rossignol D., Smith S. Thermal conductivity of geomaterial foams based on silica fume // *Journal of Materials Science*. 2012. Vol. 47. Pp. 391–396. doi: 10.1007/s10853-011-5810-3.
7. Smith D.S., Poulier C., Nait-Ali B., Michot A., Absi J. Influence of grain–grain interfaces on heat transfer in dense and porous oxide ceramics // *Ceramic Transactions*. 2007. Vol. 198 (27). doi: 10.1002/9781118144145.ch5.
8. Nait-Ali B., Haberkorn K., Vesteghem H., Absi J., Smith D.S. Preparation and thermal conductivity characterization of highly porous ceramics. Comparison between experimental results, analytical calculations and numerical simulations // *Journal of European Ceramic Society* 2007. Vol. 27(2–3). Pp. 1345–1350. doi: 10.1016/j.jeurceram-soc.2006.04.025.
9. Zhao Y., Ye J., Lu X., Liu M., Lin Y., Gong W. et al. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash // *Journal of Hazardous Materials* 2010. 174. Pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.023.
10. Aguilar R.A., Díaz O.B., García J.I.E. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash

- binders, with blast furnace slag aggregates // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 1166–1175. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024.
11. Al Bakri Abdullah M.M., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K.N., Yahya Z., Razak R.A. Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent // *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13 (6). Pp. 7186–7198. doi: 10.3390/ijms13067186.
12. Van Deventer J., Provis J., Duxson P., Brice D. Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials // *Waste and Biomass Valorization*. 2010. Vol. 1(1). Pp.145–155. doi: 10.1007/s12649-010-9015-9.
13. Van Deventer J., Provis J. and Duxson P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement // *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 29. Pp. 89–104. doi: 10.1016/j.mineng.2011.09.009.
14. Ji Z., Pei Y. Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: A review // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 231. Pp. 256–267. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.041.
15. Кривенко П.В., Скурчинская Ж.В., Бродко О.А., Желудков Г.В. Щелочные алюмосиликатные полимеры // *Материалы для строительных конструкций*. ICMB'94: Тез. докл. III междунар. научн. конф. Днепропетровск. 1994. С. 13.
16. Patent 4,349,386, US. Mineral polymers and methods of making them / Davidovits J.; 1982.
17. Rovnaník P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(7). Pp.1176–1183. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.12.023.
18. Zhang Z., Wang H., Provis J., Bullen F., Reid A. and Zhu Y. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide // *Thermochimica Acta*. 2012. Vol. 539. Pp. 23–33. doi: 10.1016/j.tca.2012.03.021.
19. Кожухова Н.И., Жерновский И.В. Геополлимерное вяжущее и бетон на основе зол-уноса ТЭС. Монография. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2015. 183 с.
20. Davidovits J. 30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. *Geopolymer 2002: Turn Potential Into Profit*, Melbourne, Australia: Siloxo Proceedings. Lukey. 2002.
21. Fletcher R.A., Mac Kenzie K.J.D., Nicholson C.L., Shimada S. The composition range of aluminosilicate geopolymers // *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. Vol. 25(9). Pp. 1471–1477. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.001.
22. Мирошников Е.В., Строкова В.В., Черватова А.В., Павленко Н.В. Наноструктурированное перлитовое вяжущее и пенобетон на его основе // *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 105–106.
23. Sanjayan J., Nazari A., Chen L., Nguyen G. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.043.
24. Abdullah M., Jamaludin L., Hussin K., Bnhussain M., Ghazali C., Ahmad M. Fly Ash Porous Material using Geopolymerization Process for High Temperature Exposure // *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13(12). Pp. 4388–4395. doi: 10.3390/ijms13044388.
25. Ul Haq E., Licciulli A. Microwave synthesis of thermal insulating foams from coal derived bottom ash // *Fuel Processing Technology*. 2015. Vol. 130. Pp. 263–267. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.10.017.
26. Sanjayan J., Nazari A., Chen L., Nguyen G. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.043.
27. Leping L., Xuemin C., Shuheng Q., Jun-li Y. and Lin Z. Preparation of phosphoric acid-based porous geopolymers // *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(4). Pp. 600–603. doi: 10.1016/j.clay.2010.10.004.
28. Arellano Aguilar R., Burciaga Díaz O. and Escalante García J. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(7). Pp. 1166–1175. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024.
29. Patent 102584323, CN. Geopolymeric light porous material and preparation method thereof / Cui X.; 2012.
30. Kara P., Shishkin A., Korjakins A. Eco cellular concrete // *International Symposium on Sustainability Eco-Crete 2014*. Reykjavik: ICE Rheo-center. 2014. Pp. 37–42.
31. Kamseu E., Zénabou N. M. Ngouloure, Benoît Nait Ali, Zekeng S., Melo U. C., Rossignol S., Leonelli C. Cumulative pore volume, pore size distribution and phases percolation in porous inorganic polymer composites: Relation microstructure and effective thermal conductivity // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 45–56. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.11.066.
32. Esmaily H., Nuranian H. Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag // *Construction and Building Materials*.

2012. Vol. 26(1). Pp. 200–206. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.010.
33. Henon J., Alzina A., Rossignol S. Potassium geopolymer foams made with silica fume pore forming agent for thermal insulation // *Journal of Porous Materials*. 2012. Vol. 20(1). Pp. 37–46. doi: 10.1007/s10934-012-9572-3.
34. Lee B., Jang Y., Kim, Y. Engineering Performance and Applicability of Environmental Friendly Porous Concrete for a Marine Ranch Using Steel Industry By-products // *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2013. Vol. 25(1). Pp. 115–123. doi: 10.4334/JKCI.2013.25.1.115.
35. Zhao Y., Ye J., Lu X., Liu M., Lin Y., Gong W., Ning G. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 174(1-3). Pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.023.
36. Bogomazova E., Kalinichenko B., Kostyukov N., Shchekina G., Makeeva T. Production of porous aluminosilicate ceramic using industrial wastes // *Glass and Ceramics*. 2011. Vol. 68(7-8). Pp. 224–226. doi: 10.1007/s10717-011-9358-0.
37. Hernández-Zaragoza J., López-Lara T., Horta-Rangel J., López-Cajún C., Rojas-González E., García-Rodríguez F., Adué J. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. Pp. 1–5. doi: 10.1155/2013/160162.
38. Kamseu E., Nait-Ali B., Bignozzi M., Leonelli C., Rossignol S., Smith D. Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements // *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. Vol. 32(8). Pp. 1593–1603. doi: 10.1016/j.jeurceram-soc.2011.12.030.
39. Zhang Z., Wang H., Reid A., Aravinthan T. Effects of fly ash source and curing procedure on strength development of geopolymers // *Incorporating sustainable practice in mechanics of structures and materials: ACMSM 21*. Melbourne: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2010. doi: 10.1201/b10571-155.
40. Hajimohammadi A., Provis J., van Deventer J. Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation // *Chemistry of Materials*. 2010. Vol. 22(18). Pp. 5199–5208. doi: 10.1021/cm101151n.
41. Aydın S., Baradan B. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars // *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37(6). Pp. 988–995. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.005.
42. Buchwald A., Oesterheld R., Hilbig H. Incorporation of Aluminate into Silicate Gels and its Effect on the Foamability and Water Resistance // *Journal of the American Ceramic Society*. 2010. Vol. 93(10). Pp. 3370–3376. doi: 10.1111/j.1551-2916.2010.03842.x.
43. Laukaitis A., Žurauskas R., Kerien J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties // *Cement and Concrete Composites*. 2005. Vol. 27. (1). Pp. 41–47. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004.
44. Vaou V., Panias D. Thermal insulating foamy geopolymers from perlite // *Minerals Engineering*. 2010. Vol. 23(14). Pp. 1146–1151. doi: 10.1016/j.mineng.2010.07.015.
45. Kioupis D., Skaropoulou A., Tsvilis S., Kakali G. Properties and durability performance of lightweight fly ash based geopolymer composites incorporating expanded polystyrene and expanded perlite // *Ceramics*. 2022. Vol. 5. Pp. 821–836. doi: 10.3390/ceramics5040060.
46. Ouda S. A., Rashad L. A. An investigation on the performance of lightweight mortar-based geopolymer containing high-volume LECA aggregate against high temperatures // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Pp. 26631–26647. doi: 10.1007/s11356-021-17819-2.
47. Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Кожухова М.И., Алфимова Н.И., Чепурных А.А. pH-показатель среды как фактор формирования поровой структуры пен // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. №8. С. 101–108. doi: 10.12737/article_5b6d586ca043d4.17885788.
48. Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 5th ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute. 2011. 680 p.
49. Hyssil.com, Geopolymer Cellular Precast Panel. (2014). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hyssil.com/geopolymercellularprecastpanel/> (дата обращения: 4.02.2023).
50. ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw and Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 2019.
51. Patent 20140264140 A1, US. High-strength geopolymer composite cellular concrete / Gong W.; 2014.
52. Madhavi S., Ferraris C., White T.J. Synthesis and crystallization of macroporous hydroxyapatite // *Journal of Solid State Chemistry*. 2005. Vol. 178. Pp. 2838–2845. doi: 10.1016/j.jssc.2005.06.039.
53. Buchwald A., Vicent M., Kriegel R. et al. Geopolymeric binders with different fine fillers-phase transformations at high temperature // *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 46. Pp. 190–195. doi: 10.1016/j.clay.2009.08.002.

Информация об авторах

Кожухова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.02.2023 г.

© Кожухова Н.И., 2023

Kozhukhova N.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Moscow Polytechnic University

E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

BACKGROUND OF GEOPOLYMER-BASED CELLULAR CONCRETE PRODUCTION

Abstract. Geopolymer systems are currently quite promising among scientists in the field of building materials science in terms of energy-saving free of cement binders and athermal synthesis materials due to a wide list of their positive properties that compete well with traditional analogs such as cement and cement concrete. The article provides a literary review of the current research and practical experience among Russian and foreign scientists on the issue of the synthesis of cellular concrete based on geopolymer. Based on a review analysis of modern publications in this field over the past 20-25 years, it has been shown that the key parameters that dominate the formation of a high-quality pore structure, as well as the thermophysical and mechanical properties of cellular geopolymer concrete are the following: choice and preparation of the main raw material, taking into account its chemical the nature and microstructure of the system, the type of modifying and pore-forming component, the sequence of introduction of components, the conditions and mode of hardening, the technology of pore formation, etc. As a result of analytical research, it was also revealed that, despite the rather large number of works devoted to obtaining cellular geopolymer systems, in general, today there is no deep understanding of the principles of formation and behavior of the pore structure during the operational period in geopolymer systems.

Keywords: geopolymer, cellular concrete, porous structure, synthesis methods, performance properties.

REFERENCES

1. Zhang Z., Provis J., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
2. Slavcheva G.S., Chernyshov E.M., Novikov M.V. Thermal efficient foam concretes of a new generation for low-rise construction [Теплоэффективные пенобетонные материалы нового поколения для малоэтажного строительства]. *Stroitel'nye Materialy*. 2017. No. 7. Pp. 20–24. (rus)
3. Ishizaki K., Komarneni S., Nauko M. *Porous Materials: Process Technology and Applications*. London: Kluwer. 1998. 240 p.
4. Luyten J., Mullens S., Snijders F., Buekenhoudt A. Global Roadmap for Ceramics-ICC2. Proceedings, ISTECCNR. PoreArchitecture for a Vast Range of Applications. Verona. 2008. Pp. 309–316.
5. Innocentini M.D.M., Sepulveda P., Salvini V.R., Pandolfelli V.C., Coury J.R. Permeability and structure of cellular ceramics: a comparison between two preparation techniques. *Journal of the American Ceramic Society*. 1998. Vol. 81(12). No. 3349. doi: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02782.x.
6. Bourret E., Prud'homme S., Rossignol D., Smith S. Thermal conductivity of geomaterial foams based on silica fume. *Journal of Material Science*. 2012. Vol. 47. Pp. 391–396. doi: 10.1007/s10853-011-5810-3.
7. Smith D.S., Poulier C., Nait-Ali B., Michot A., Absi J. Influence of grain–grain interfaces on heat transfer in dense and porous oxide ceramics. *Ceramic Transactions*. 2007. Vol. 198 (27). doi: 10.1002/9781118144145.ch5.
8. Nait-Ali B., Haberko K., Vesteghem H., Absi J., Smith D.S. Preparation and thermal conductivity characterization of highly porous ceramics. Comparison between experimental results, analytical calculations and numerical simulations. *Journal of European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27(2–3). No. 1345. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.025.
9. Zhao Y., Ye J., Lu X., Liu M., Lin Y., Gong W. et al. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. 174. Pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.023.
10. Aguilar R.A., Diaz O.B., Garcia J.I.E. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 1166–1175. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024.
11. Al Bakri Abdullah M.M., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K.N., Yahya Z., Razak R.A. Fly ash-based geopolymer lightweight concrete us-

ing foaming agent. *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13 (6). Pp. 7186–7198. doi: 10.3390/ijms13067186.

12. Van Deventer J., Provis J., Duxson P., Brice D. Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials. *Waste and Biomass Valorization*. 2010. Vol. 1(1). Pp. 145–155. doi: 10.1007/s12649-010-9015-9.

13. Van Deventer J., Provis J. and Duxson P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 29. Pp. 89–104. doi: 10.1016/j.mineng.2011.09.009.

14. Ji Z., Pei Y. Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: A review. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 231. Pp. 256–267. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.041.

15. Krivenko P.V., Skurchinskaya Zh.V., Brodtko O.A., Zheludkov G.V. Alkaline aluminosilicate polymers. Materials for building structures [Shchelochnyye alyumosilikatnyye polimery. Materialy dlya stroitel'nykh konstruksiy]. ICMB'94: Abstracts of the III International Scientific Conference. Dnepropetrovsk. 1994, p. 13. (rus)

16. Patent 4,349,386, US. Mineral polymers and methods of making them / Davidovits J.; 1982.

17. Rovnaník P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(7). Pp. 1176–1183. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.12.023.

18. Zhang Z., Wang H., Provis J., Bullen F., Reid A. and Zhu Y. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide. *Thermochemica Acta*. 2012. Vol. 539. Pp. 23–33. doi: 10.1016/j.tca.2012.03.021.

19. Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V. Geopolymer binder and concrete based on TPP fly ash [Geopolimernoye vyazhushcheye i beton na osnove zolunosa TES]. Monograph. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2015. 183 p. (In Russian)

20. Davidovits J. 30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. *Geopolymer 2002: Turn Potential Into Profit*, Melbourne, Australia: Siloxo Proceedings. Lukey. 2002.

21. Fletcher R.A., Mac Kenzie K.J.D., Nicholson C.L., Shimada S. The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of European Ceramic Society*. 2005. Vol. 25(9). Pp. 1471–1477. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.001.

22. Miroshnikov E.V., Stokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V. Nanostructured perlite

binder and foam concrete based on it [Nanostrukturovannoye perlitovoye vyazhushcheye i penobeton na yego osnove]. *Stroitel'nyye materialy*. 2010. No. 9. Pp. 105–106. (rus).

23. Sanjayan J., Nazari A., Chen L., Nguyen G. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.043.

24. Abdullah M., Jamaludin L., Hussin K., Bnhussain M., Ghazali C., Ahmad M. Fly Ash Porous Material using Geopolymerization Process for High Temperature Exposure. *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13(12). Pp. 4388–4395. doi: 10.3390/ijms13044388.

25. Ul Haq E., Licciulli A. Microwave synthesis of thermal insulating foams from coal derived bottom ash. *Fuel Processing Technology*. 2015. Vol. 130. Pp. 263–267. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.10.017.

26. Sanjayan J., Nazari A., Chen L., Nguyen G. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.043.

27. Leping L., Xuemin C., Shuheng Q., Jun-li Y. and Lin Z. Preparation of phosphoric acid-based porous geopolymers. *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(4). Pp. 600–603. doi: 10.1016/j.clay.2010.10.004.

28. Arellano Aguilar R., Burciaga Díaz O., Escalante García J. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(7). Pp. 1166–1175. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024.

29. Patent 102584323, CN. Geopolymeric light porous material and preparation method thereof / Cui X.; 2012.

30. Kara P., Shishkin A., Korjakins A. Eco cellular concrete. *International Symposium on Sustainability Eco-Crete 2014*. Reykjavik: ICE Rheocenter. 2014. Pp. 37–42.

31. Kamseu E., Zénabou N. M. Ngouloure, Benoît Nait Ali, Zekeng S., Melo U. C., Rossignol S., Leonelli C. Cumulative pore volume, pore size distribution and phases percolation in porous inorganic polymer composites: Relation microstructure and effective thermal conductivity. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 45–56. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.11.066.

32. Esmaily H., Nuranian H. Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 26(1). Pp. 200–206. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.010.

33. Henon J., Alzina A., Rossignol S. Potassium geopolymer foams made with silica fume pore forming agent for thermal insulation. *Journal of Porous Materials*. 2012. Vol. 20(1). Pp. 37–46. doi: 10.1007/s10934-012-9572-3.
34. Lee B., Jang Y., Kim, Y. Engineering Performance and Applicability of Environmental Friendly Porous Concrete for a Marine Ranch Using Steel Industry By-products. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2013. Vol. 25(1). Pp. 115–123. doi: 10.4334/JKCI.2013.25.1.115.
35. Zhao Y., Ye J., Lu X., Liu M., Lin Y., Gong W., Ning G. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 174(1–3). Pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.023.
36. Bogomazova E., Kalinichenko B., Kostyukov N., Shchekina G., Makeeva T. Production of porous aluminosilicate ceramic using industrial wastes. *Glass and Ceramics*. 2011. Vol. 68(7–8). Pp. 224–226. doi: 10.1007/s10717-011-9358-0.
37. Hernández-Zaragoza J., López-Lara T., Horta-Rangel J., López-Cajún C., Rojas-González E., García-Rodríguez F., Adué J. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. Pp. 1–5. doi: 10.1155/2013/160162.
38. Kamseu E., Nait-Ali B., Bignozzi M., Leonelli C., Rossignol S., Smith D. Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. Vol. 32(8). Pp. 1593–1603. doi: 10.1016/j.jeurceram-soc.2011.12.030.
39. Zhang Z., Wang H., Reid A., Aravinthan T. Effects of fly ash source and curing procedure on strength development of geopolymers. *Incorporating sustainable practice in mechanics of structures and materials: ACMSM 21*. Melbourne: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2010. doi: 10.1201/b10571-155.
40. Hajimohammadi A., Provis J., van Deventer J. Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation. *Chemistry of Materials*. 2010. Vol. 22(18). Pp. 5199–5208. doi: 10.1021/cm101151n.
41. Aydın S., Baradan B. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37(6). Pp. 988–995. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.005.
42. Buchwald A., Oesterheld R., Hilbig H. Incorporation of Aluminate into Silicate Gels and its Effect on the Foamability and Water Resistance. *Journal of the American Ceramic Society*. 2010. Vol. 93(10). Pp. 3370–3376. doi: 10.1111/j.1551-2916.2010.03842.x.
43. Laukaitis A., Žurauskas R., Kerien J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites*. 2005. Vol. 27. (1). Pp. 41–47. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004.
44. Vaou V., Panias D. Thermal insulating foamy geopolymers from perlite. *Minerals Engineering*. 2010. Vol. 23(14). Pp. 1146–1151. doi: 10.1016/j.mineng.2010.07.015.
45. Kioupis D., Skaropoulou A., Tsvivilis S., Kakali G. Properties and durability performance of lightweight fly ash based geopolymer composites incorporating expanded polystyrene and expanded perlite. *Ceramics*. 2022. Vol. 5. Pp. 821–836. doi: 10.3390/ceramics5040060.
46. Ouda S. A., Rashad L. A. An investigation on the performance of lightweight mortar-based geopolymer containing high-volume LECA aggregate against high temperatures. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Pp. 26631–26647. doi: 10.1007/s11356-021-17819-2.
47. Kozhukhova N.I., Danakin D.N., Kozhukhova M.I., Alfimova N.I., Chepurnykh A.A. pH-value of reaction medium as a factor of foam structure formation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 8. Pp. 101–108. doi: 10.12737/article_5b6d586ca043d4.17885788.
48. Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 5th ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute. 2011. 680 p.
49. Hyssil.com, Geopolymer Cellular Precast Panel. (2014). URL: <http://www.hyssil.com/geopolymercellularprecastpanel/> (date of treatment: 04.02.2023).
50. ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw and Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 2019.
51. Patent 20140264140, US. A1 High-strength geopolymer composite cellular concrete Gong W.; 2014.
52. Madhavi S., Ferraris C., White T.J. Synthesis and crystallization of macroporous hydroxyapatite. *Journal of Solid State Chemistry*. 2005. Vol. 178. Pp. 2838–2845. doi: 10.1016/j.jssc.2005.06.039.
53. Buchwald A., Vicent M., Kriegel R. et al. Geopolymeric binders with different fine fillers-phase transformations at high temperature. *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 46. Pp. 190–195. doi: 10.1016/j.clay.2009.08.002.

Information about the authors

Kozhukhova, Natalia I. PhD, Assistant Professor. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Received 06.02.2023

Для цитирования:

Кожухова Н.И. Опыт производства ячеистых бетонов на основе геополимерных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-23

For citation:

Kozhukhova N.I. Background of geopolymer-based cellular concrete production. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-23