

УДК 691.3

**ЭНЕРГО- И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫЕ  
ВЫСОКОКРЕМНЕЗЕМИСТЫЕ ЩЕЛОЧЕАКТИВИРОВАННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Н.Н. Клименко, Н.Ю. Михайленко, А.С. Чайникова  
ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева», г. Москва

В настоящее время одним из путей «устойчивого развития» является разработка эффективных строительных материалов. Актуальным трендом является расширение производства бесцементных вяжущих с низкими затратами энергетических и природных минеральных сырьевых ресурсов и использованием побочных продуктов и отходов промышленности. Наиболее интенсивно ведутся исследования по разработке щелочеактивированных материалов, которые отличаются от клинкерных вяжущих химическим и минеральным составом; эффективностью в решении проблем ресурсо- и энергосбережения и отсутствием выбросов загрязняющих окружающую среду веществ, в том числе  $\text{CO}_2$ ; широким диапазоном сырьевой базы; повышенной стойкостью к воздействию атмосферной коррозии, химических сред, высокой температуры и радиации; широтой номенклатуры материалов на их основе и областей применения. Исследователи [1, 2] особенно подчеркивают экономические и экологические преимущества щелочеактивированных материалов (другое название – геополимеры), к классу которых относятся и разрабатываемые высококремнеземистые материалы на жидкостекольном связующем.

Проблема создания эффективных строительных материалов особенно актуальна в связи с увеличением объёмов строительства в России, активно развивающихся в рамках программы Правительства РФ «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года». Энергоэффективность и энергосбережение утверждены Указом Президента РФ от 2011 г. в качестве приоритетных направлений развития науки, технологий и техники. Исследование и разработка экологически безопасных и энергоэффективных строительных материалов является также одним из ключевых направлений, финансируемых в рамках европейской программы по научным исследованиям и инновациям «Горизонт 2020».

Одним из основных направлений развития современного строительного материаловедения является разработка новых видов эффективных материалов с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. С точки зрения энерго- и ресурсоэффективности высококремнеземистые композиты безобжигового твердения на основе природного кварцевого сырья, промышленных отходов и ще-

лочных связующих являются перспективными. Среди преимуществ высококремнеземистых щелочеактивированных материалов можно выделить следующие: использование дешевых и недефицитных сырьевых материалов, в том числе отходов промышленности; использование несложной технологии, не требующей специального оборудования; отсутствие высокотемпературной обработки; повышенные эксплуатационные свойства (высокая прочность, морозостойкость, абразивоустойчивость). Перечисленные преимущества позволяют рассчитывать на конкурентоспособность разрабатываемых безобжиговых высококремнеземистых материалов и изделий на их основе.

Согласно литературным данным [2], один из серьезных недостатков цементных вяжущих – это повышенная капиллярная пористость цементного камня и его щелочность ( $\text{pH} > 13,0$ ), которые создают условия для взаимодействия с окружающей средой (карбонизации, растворения), что может привести к разрушению цементного камня. На этом основании некоторые исследователи говорят о невысокой прочности и долговечности цементных вяжущих. Щелочеактивированные материалы, напротив, рассматриваются как наиболее долговечные в силу значительных отличий в химическом, минералогическом и фазовом составе [3]. При создании щелочеактивированных вяжущих моделируются процессы формирования минералов земной коры и камнеподобных горных пород, а именно цеолитов, устойчивых к воздействию атмосферных факторов.

Таким образом, актуальная задача создания долговечных ресурсо- и энергоэффективных композиционных материалов с повышенными физико-механическими свойствами и повышенным сопротивлением коррозии, в том числе биологической, требует нахождения ответов на ряд вопросов, касающихся механизмов атмосферной, биологической и химической коррозии безобжиговых щелочеактивированных систем; создания и реализации комплекса методов воздействия на структуру, фазовый и минералогический состав материала на стадии его проектирования.

Целью данного исследования является оценка и прогнозирование долговечности разрабатываемых безобжиговых материалов на основе щелочеактивированных высококремнеземистых композиций; изучение закономерностей управления процессами структурообразования в щелочеактивированных высококремнеземистых системах, обеспечивающих формирование искусственного камня с повышенными физико-механическими свойствами и коррозионной устойчивостью, в том числе к биофакторам, за счет определенного фазового состава и поровой структуры.

На кафедре химической технологии стекла и ситаллов РХТУ им. Д.И. Менделеева синтезированы высококремнеземистые материалы (до 95 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) на основе кварцевого песка, гранулированного доменного шлака и жидкостекольного связующего с использованием энергоэффективной безобжиговой технологии и комплексной активации сырьевых смесей (механической, химической, термической) с уровнем эксплуатационных характеристик не ниже следующих: прочность при сжатии – 95–140 МПа; прочность при изгибе – 20–50 МПа; истираемость 0,09–0,15 г/см<sup>2</sup>; водостойкость ( $K_{\text{размягчения}}$ ) – 0,8–1; биостойкость (степень обрастаемости грибами – 0); морозостойкость F100; химстойкость по отношению к неорганическим кислотам не менее 95 %, химстойкость по отношению к щелочам не менее 98 %.

Предложена и экспериментально обоснована технологическая схема получения безобжиговых высококремнеземистых материалов на жидкостекольном связующем. Оптимизированы технологические параметры отдельных стадий, в зависимости от состава сырьевых смесей рекомендована низкотемпературная сушка или тепловлажностная обработка заготовок при температуре 80–90 °С.

Исследовано влияние состава и структуры высококремнеземистых материалов на их физико-химические и механические свойства. Установлена роль основных сырьевых компонентов, связующего и модифицирующих добавок на процессы формирования искусственного камня, его фазового и минералогического состава, поровой структуры[4]. Эффективным фактором повышения прочности композиций на жидкостекольном связующем (в 5–6 раз) является механоактивация кварцевого песка, обуславливающая в результате увеличения его удельной поверхности возрастание дефектности кристаллической решетки и частичную аморфизацию зерен кварца, что в комплексе приводит к повышению реакционной способности песка и интенсификации его взаимодействия с жидким стеклом.

В результате комплексного исследования безобжиговых высококремнеземистых материалов методами лазерного спектрального анализа, ИК- и КР-спектроскопии, РФА, ДТА, СЭМ выявлены особенности и предложены механизмы их твердения и структурообразования, зависящие от состава сырьевой смеси и условий ее твердения[4]. Ключевую роль в структурообразовании материалов на основе кварцевого песка при низкотемпературной сушке играет формирование и полимеризация аморфного кремнегеля (дегидратационно-полимеризационный механизм). В присутствии доменного шлака при тепловлажностной обработке наблюдается повышение интенсивности

процессов гелеобразования, выделение CSH–геля и его кристаллизация (дегидратационно-кристаллизационный механизм).

Подобран вид модифицирующих добавок, придающих фунгицидные свойства высококремнеземистым щелочеактивированным материалам. Получен набор экспериментальных данных, который позволяет сравнить устойчивость разрабатываемых высококремнеземистых материалов и традиционных вяжущих материалов, а также оценить влияние временного фактора на изменение свойств высококремнеземистых материалов [5].

Исследования выполнены на оборудовании кафедры химической технологии стекла и ситаллов, кафедры биотехнологии и Центра коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-33-01095 мол\_а).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Provis J.L., Palomo A., Shi C. Advances in understanding alkali-activated materials //Cement and Concrete Research. – 2015.

2. Provis J.L. Alkali-activated materials //Cement and Concrete Research. – 2017.

3. Zhang J. et al. Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies //Construction and Building Materials. – 2017. – Т. 152. – С. 598–613.

4. Михайленко Н.Ю., Клименко Н.Н. Оптимизация технологических параметров синтеза высококремнеземистых жидкостекольных композитов строительного назначения // Стекло и керамика. – 2013. – №. 5. – С. 11–17.

5. Михайленко Н.Ю., Клименко Н.Н., Бабусенко Е.С. Высокремнеземистые композиционные материалы с повышенным сопротивлением биокоррозии // Материаловедение. – 2017. – №. 5. – С. 43–47.

УДК 543.52

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОРМ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

А.Г. Губская, Т.А. Вашкевич, Н.И. Ушакова

Государственное предприятие «Институт НИИСМ», г. Минск

Природные источники ионизирующего излучения вносят основной вклад в дозу облучения населения. Средняя эффективная эквивалентная доза, обусловленная природными источниками, составляет