

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПУЦЦОЛАНОВУЮ
АКТИВНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ**

Кабулова Лола Балтамуратовна – доктор философии по техническим наукам, доцент
kabulova1806@mail.ru

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

Темирбаева Журсинай Муратбаевна – магистрант
Нукусский государственный технический университет

**ГИЛЛИ МИНЕРАЛЛАРИНИНГ ПУЦЦОЛАН ФАОЛЛИГИГА
ТЕРМИК ИШЛОВ БЕРИШНИНГ ТАЪСИРИ**

Кабулова Лола Балтамуратовна – техника фанлари бўйича фалсафа доктори, доцент
Ажиниёз номидаги Нукус давлат педагогика институти

Темирбаева Журсинай Муратбай қизи – магистрант
Нукус давлат техника университети

**INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON THE POZZOLANIC
ACTIVITY OF CLAY MINERALS**

Kabulova Lola Baltamuratovna – Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Associate Professor
Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz

Temirbayeva Jursinay Muratbay qizi – master's student
Nukus State Technical University

Таянч сўзлар: цемент, гилли минераллари, каолинит, монтмориллонит, туффит, иссиқлик фаоллашуви, пуццолон фаоллиги.

Резюме. Мақолада цемент саноати учун қизиқиш уйғотадиган гил минералларининг пуццолан фаоллигига иссиқлик ишлов беришининг таъсири ўрганилган. Гил жинсларининг асосий минералларининг тузилиши ва хоссалари таҳлил қилинган, иссиқлик фаоллашуви механизмлари ва иситиш жараёнида минералогик фазаларнинг ўзгариши баён этилган. Пуццолан фаоллигини баҳолаш усуллари, шу жумладан тўғридан-тўғри ва билвосита усуллар кўриб чиқилган. Каолинит ва монтмориллонит гуруҳларига мансуб минераллар, шунингдек, опокасимон туффит жинсларига алоҳида эътибор қаратилган бўлиб, улар термик ишловдан сўнг энг юқори реакция фаоллигини намоён этади. Термик фаоллаштирилган гил жинисларини кам клинкерли цемент таркибига қўллашнинг мақсадга мувофиқлиги ва бу усул CO₂ чиқиндиларини камайтиришга имкон бериши ҳақида ҳулосалар чиқарилган.

Ключевые слова: цемент, глинистые минералы, каолинит, монтмориллонит, туффит, термическая активация, пуццолановая активность.

Резюме. В статье исследуется влияние термической обработки на пуццолановую активность глинистых минералов, представляющих интерес для цементной промышленности. Проанализированы структура и свойства основных минералов глин, а также механизмы термической активации и изменения минералогических фаз при нагревании. Рассмотрены методы оценки пуццолановой активности, включая прямые и косвенные. Особое внимание уделено минералам каолинитовой и монтмориллонитовой групп, а также опоковидным туффитовым породам, которые проявляют наибольшую реакционную способность после термической обработки. Сделаны выводы о целесообразности использования термически активированных глин в составе низкоклинкерных цементов, что позволяет снизить уровень выбросов CO₂.

Key words: cement, clay minerals, kaolinite, montmorillonite, tuffite, thermal activation, pozzolanic activity.

Summary. The article investigates the influence of thermal treatment on the pozzolanic activity of clay minerals of interest to the cement industry. The structure and properties of the main minerals of clay rocks are analyzed, and the mechanisms of thermal activation and changes in mineralogical phases during heating are described. Methods for assessing pozzolanic activity, including both direct and indirect approaches, are considered. Special attention is given to minerals of the kaolinite and montmorillonite groups, as well as to opoka-like tuffite rocks, which exhibit the highest reactivity after thermal treatment. Conclusions are drawn regarding the feasibility of using thermally activated clays in low-clinker cements, which helps reduce CO₂ emissions.

Введение. Устойчивое развитие определяется как концепция общественного прогресса, ориентированная на удовлетворение потребностей настоящего поколения при сохранении способности будущих поколений удовлетворять свои потребности. Реализация этой концепции осложняется интенсивными антропогенными выбросами парниковых газов, прежде

всего CO₂, что способствует глобальному потеплению и экологическим последствиям.

Строительная отрасль является одним из крупнейших источников выбросов CO₂, при этом цементная промышленность формирует около 5% глобальной эмиссии. Высокий вклад объясняется значительной энергоёмкостью производства

портландцемента: для получения 1 т клинкера в сухих процессах требуется 3,1-3,8 ГДж тепловой энергии, а в устаревших мокрых печах до 6 ГДж/т. Кроме того, значительная часть выбросов образуется при декарбонизации известняка:



Снижение энергоёмкости производства ограничено: даже при оптимизации технологических процессов минимальное потребление тепла составляет около 2,9 ГДж/т клинкера. Дополнительное сокращение выбросов CO_2 возможно за счёт использования альтернативных видов топлива и активных минеральных добавок, прежде всего пуццоланов.

Пуццоланы – кремнеземистые или глиноземистые материалы, не обладающие самостоятельной гидравлической активностью, но взаимодействующие с гидроксидом кальция в присутствии воды с образованием цементных гидратированных соединений [2]. Среди активных добавок традиционно используются летучая зола ТЭС и гранулированный доменный шлак, однако их ресурсы ограничены [3, 4].

Поэтому актуальным является изучение местных глин и туффитов, способных после термической активации проявлять высокую пуццолановую активность.

Обсуждение. Минералогический состав глин. Глинистые минералы делятся на группы 1:1 и 2:1 по слоистой структуре, состоящей из тетраэдрических (Т) и октаэдрических (О) слоёв.

➤ Минералы 1:1: чередуются слои Т и О. Включают каолиниты (каолинит, диксит, никрит, галлузит, гизингерит) и серпентины (лизардит, антигорит, хризотил и др.).

➤ Минералы 2:1: два тетраэдрических слоя чередуются с одним октаэдрическим. Включают пиррофиллит, тальк, слюды (мусковит, иллит), смектиты (монтмориллонит), вермикулит, хлориты и смешанные структуры.

Минералы 1:1 проявляют высокую пуццолановую активность после термической обработки, особенно каолинит и его модификации. Среди минералов 2:1 наибольший интерес представляют монтмориллониты, включая Са- и Na-монтмориллонит [2, 4-6].

Термическая активация глин. Сырые глины обычно имеют низкую или умеренную пуццолановую активность. После термической обработки их реакционная способность значительно возрастает за счёт дегидроксилирования, аморфизации и изменения координации ионов алюминия (Al^{3+}). Это повышает растворимость Al^{3+} и Si^{4+} - ключевой фактор для образования гидратированных цементных соединений (C-S-H, гидратированные алюминаты кальция) [1-6].

Температуры прокаливания выбираются так, чтобы разрушить исходную структуру минералов, но не вызвать образование химически инертных фаз. Эффективность активации зависит от температуры, времени обработки, размера частиц и минералогического состава (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение пуццолановой активности минералов после термической обработки

Минерал	Тип структуры	Температура прокаливания, °C	Пуццолановая активность	Вывод
Каолинит	1:1	700-800	Высокая	Превращается в метакеолин
Монтмориллонит	2:1	600-800	Средняя-высокая	Активность снижается >800°C
Иллит	2:1	930-950	Умеренная	Ограниченный пуццолановый потенциал
Мусковит	2:1	500-950	Низкая-умеренная	Зависит от температуры
Сепиопилит	2:1	850	Умеренная	Снижает водопотребность

Пуццолановые свойства природных туффитов. В Узбекистане также изучались пуццоланические свойства природных туффитовых опоковидных глинистых пород после термической обработки. В цементной промышленности страны туффиты используются исключительно на «Кизилкумцементе». Их включение в состав цемента позволяет снижать долю клинкера, уменьшать выбросы CO_2 и повышать долговечность и прочностные характеристики цементных растворов за счёт образования гидратированных соединений кальция и силикатов (C-S-H) и алюминатов.

Туффитовые породы, кроме глинистых компонентов, содержат значительное количество карбоната кальция. Обжиг при температурах выше 700°C снижает активность пород из-за связывания активных SiO_2 и Al_2O_3 известью, образующейся при разложении CaCO_3 . При обжиге 600°C материал сохраняет активные кремнекислоты (определены методом пятикратного выщелачивания 5%-ным раствором соды, результат 136,6 мг/л).

Термообработка туффита улучшает пуццолановые свойства материала: повышается стойкость цементных растворов во времени и увеличивается их прочность в ранние сроки твердения (через 7 дней). Максимальные значения указанных свойств достигаются при обжиге 600°C в течение 2 часов [7].

Методы оценки пуццолановой активности. Пуццолановая реакция протекает между $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с обязательным участием воды, приводя к образованию:

- геля C-S-H ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$);
- гидратированных алюминатов кальция (C_4AH_{13} , C_2AH_8 , C_3AH_6);
- гидратированных алюмосиликатов кальция (гидрогеленит C_2ASH , гидрогранаты $\text{C}_3\text{AS}_3\text{-C}_3\text{AH}_6$);
- карбоалюминатов в присутствии CO_2 или известняка ($\text{C}_4\text{ACH}_{11}$).

Методы оценки пуццолановой активности. Существует множество методов определения пуццолановой активности, которые делятся на прямые и косвенные. Прямые методы – измерение содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и анализ продуктов реакции с течением времени (рентгеновская дифракция, термогравиметрия, тест Фратини). Косвенные методы – влияние пуццолана на прочность раствора, электропроводность, теплоту гидратации.

Таблица 2. Сравнение методов оценки пуццолановой активности

Метод	Принцип работы	Преимущества	Недостатки
Фратини (ион-ионный)	Определение связывания Ca^{2+} суспензией $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Быстрое тестирование, прямой метод	Чувствителен к качеству воды
Фратини (прочность)	Сравнение прочности растворов с пуццоланом	Простая оценка механических свойств	Длительное время испытаний

Графф	Влияние пуццолана на прочность цементного раствора	Дает комплексную оценку	Требует подготовки нескольких серий образцов
ГОСТ 6269-54	Количество связанного гидроксида кальция	Стандартизирован, совместим с лабораториями	Длительное время (28-30 дней)

Выводы. Применение низкоклинкерных цементов с термически активированными глинами и туффитами способствует значительному повышению пуццолановой активности минеральных добавок, улучшению прочностных характеристик цементных растворов на ранних сроках твердения и их долговечности. Оптимальные условия активации 600°C в течение 2 часов, что обеспечивает максимальную пуццолановую активность и прочность цементных растворов на ранних сроках твердения. Использование таких активированных материалов позволяет снижать выбросы CO_2 и повышать экологическую устойчивость цементного производства.

Литература

1. Scrivener K., John V.M., Gartner E. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions. // Cement and Concrete Research, 2018, vol. 114. – P. 2-26.
2. ASTM C125-22. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM International, 2022.
3. Gartner E.M., Sui T. Alternative cementitious materials for sustainable construction. // Cement and Concrete Research. 2018. vol. 114. – P. 27-45.
4. Grim R.E. Clay Mineralogy. McGraw-Hill, – New York: 1968.
5. Garg A., Skibsted J. NMR study of calcined montmorillonite and pozzolanic activity. // Cement and Concrete Research. 2010. 40(1). – P. 85-91.
6. Murray H.H. Applied Clay Mineralogy. Elsevier, Amsterdam. 2007.
7. Кабулова Л. и др. Термообработанный туффит – как гидравлическая добавка для портландцемента. // Евразийский журнал инженерных наук и технологий. 2022, № 3. – P. 24-28.
8. ГОСТ 6269-54. Цементы. Методы определения пуццолановой активности.