

НЕЙТРОННЫЕ ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРЕВНЕЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ УТВАРИ ИЗ МОГИЛЬНИКА АКТЕРЕК, РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

М. Кенесарин, К. Назаров, В. С. Смирнова, С. Е. Кичанов, Б. Мухаметулы*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: veronicasm@jinr.ru

С помощью нейтронной томографии изучены пространственное расположение, распределение размеров и форма внутренних пор в нескольких археологических керамических сосудах из могильника Актерек в Жамбылском районе Алматинской области Республики Казахстан. Эксперимент по нейтронной томографии был проведен на установке ТИТАН исследовательского реактора ВВР-К [1]. На основе полученных нейтронных данных проведена сегментация внутренних пор и рассчитано значение пористости для древних керамических образцов. Средний объем пор и пористость образцов варьируются от минимального значения 0,08% до максимального 0,39%. Кроме того, некоторые содержат дополнительные включения, характеризующиеся высоким коэффициентом затухания нейтронов, с объемами 0,36% и 0,14% соответственно. На основании предыдущих исследований, предполагается, что это кальцитные фазы.

Для оценки размеров пор использовался параметр эквивалентного диаметра [2]. Эквивалентный диаметр соответствует диаметру сферы с таким же объемом, как у поры неправильной формы. Средний и медианный размер пор во всех образцах составляет от 0,5 до 2,5 мм. Однако статистические распределения по размерам пор достаточно сложны. Для более детального анализа распределений размеров пор мы использовали аппроксимацию экспериментальных данных с помощью функции плотности вероятности с непараметрическим методом оценки плотности ядра с полосой пропускания Сильвермана. В рамках этого подхода мы можем сравнивать рассчитанные распределения от образца к образцу (рис.1а). Для большинства образцов наблюдается асимметричное распределение с выраженным максимумом. Однако для других образцов на кривой распределения также наблюдается отчетливое плечо с вторичным пиком, что свидетельствует о формировании двух различных распределений размеров пор — мелких пор со средним размером до 1,5 мм и более крупных с размерами более 2,2 мм. Предполагается, что наличие более крупных пор может указывать на более длительный процесс обжига при более высоких температурах.

Изменение температуры отжига или продолжительности обжига может привести к увеличению размера пор, а также к изменению их морфологии в сторону более неупорядоченных, несферических вытянутых форм. Вытянутость пор можно оценить с помощью параметра удлинения [3]. В этом случае объем пор аппроксимируется эллипсоидом, а удлинение трехмерного объекта оценивается по соотношению осей. Полученные вероятностные распределения параметров удлинения пор представлены на рис. 1б. Видно, что распределения являются бимодальными, с двумя широкими максимумами. Первый максимум соответствует значению сферичности $\sim 0,2$, что указывает на уплощенные, сильно вытянутые частицы с соотношением осей примерно 1:5. На основании расчетных данных можно предположить, что большинство пор имеют вытянутую форму, сильно сплюснутую вдоль одной из осей эллипсоида. Второй максимум $\sim 0,6$ соответствует более идеальным симметричным частицам с разницей радиусов не более чем в 1,5 раза.

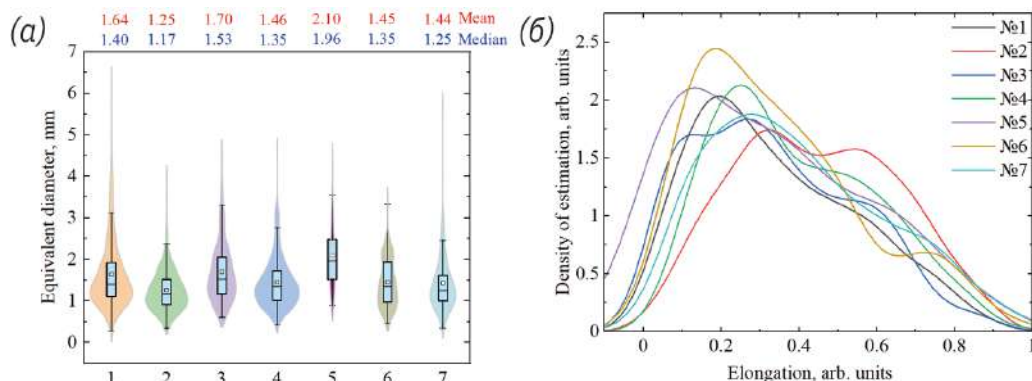


Рис. 1. Плотность вероятности распределения: а – для параметра эквивалентного диаметра; б – для параметра удлинения.

Для фазового анализа керамического материала использовали рамановскую спектроскопию. Спектры при комнатной температуре получали с помощью спектрометра Solver Spectrum (NT-MDT, Зеленоград, Россия) с длиной волны 473 нм. Доминирующей фазой является кварц, также обнаружены фазы гематита, ортоклаза и титана. Фаза аморфного углерода была обнаружена внутри объема почти всех исследованных керамических сосудов. Это позволяет оценить температуру обжига керамических изделий на основе относительной высоты дублета комбинационного рассеяния HD/HG [4]. Получили, что одна половина керамических изделий имеет температуру обжига около 720 °С, тогда как температура обжига для остальных сосудов несколько ниже: ~680 °С.

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта № AP23490652.

1. K. Nazarov et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. **982**, 164572 (2020).
2. I. Yu. Zel et al., Cem. Concr. Compos. **119**, 103993 (2021).
3. V. Angelidakis et. al., Powder Technol. **396**, 689–695 (2022).
4. A. Coccato, J. Raman Spectrosc. **46**, 1003–1015 (2015).