

Б. А. Бакиров¹, И. А. Сапрыкина², В. С. Смирнова³

^{1, 3} Объединенный институт ядерных исследований,

Дубна, Россия

^{1, 2, 3} Институт археологии РАН,

Москва, Россия

МЕТОД НЕЙТРОННОЙ ТОМОГРАФИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ НАХОДОК

Аннотация. Представлено применение нейтронной томографии в археологических исследованиях металлических артефактов из некрополя Волна 1. Метод использовался для изучения внутренней структуры артефактов, позволил выявить участки разной сохранности металлов, наличие продуктов коррозии, а также особенности конструкции. Дифракционные исследования позволили получить дополнительную информацию о фазовом составе.

Ключевые слова: нейтронная томография, некрополь Волна 1, металлические артефакты

Исследование выполнялось при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-18-00196.

Введение. Метод нейтронной радиографии и томографии открывает уникальные возможности для получения трехмерных изображений внутренней структуры объектов, а также определения пространственного распределения их состава

[Strobl, Lehmann, 2024, p. 293]. Исследования, проведенные с использованием этих методов на объектах культурного наследия, включая археологические находки, продемонстрировали их высокую эффективность при анализе образцов

из цветных и драгоценных металлов, черных металлов, керамики и дерева. Нейтронная томография (далее – НТ) представляет собой неразрушающий метод визуализации, основанный на взаимодействии нейтронов с материей, который находит все более широкое применение в археологии. Этот метод позволяет исследовать внутреннюю структуру артефактов и объектов культурного наследия без риска их разрушения.

НТ основывается на принципах рассеяния и поглощения нейтронов – нейтральных частиц, которые взаимодействуют с ядрами атомов, предоставляя информацию о внутренней структуре объектов [Strobl, Lehmann, 2024, p. 12]. При прохождении нейтронов через образец часть из них рассеивается, а другая поглощается в зависимости от состава и плотности материалов. Вызванное таким образом ослабление нейтронного пучка детектируется, что позволяет создавать трехмерные изображения структуры образца. Метод НТ обладает рядом уникальных преимуществ, таких как большая глубина проникновения, высокая чувствительность к легким элементам и хороший контраст для элементов с близкими атомными числами. Поэтому во многих мировых и российских нейтронных центрах, таких как Объединенный институт ядерных исследований (далее – ОИЯИ) и НИЦ «Курчатовский институт», реализуются программы по изучению археологических находок с помощью НТ.

Используя различные степени ослабления интенсивности нейтронного пучка при прохождении через материалы с различным химическим составом, плотностью и толщиной, можно получать информацию о внутреннем строении объектов с пространственным разрешением на микронном уровне. Данные, полученные таким образом об археологических артефактах, позволяют восстановить первоначальный облик объектов, установить технологии их изготовления и определить их аутентичность.

Городской некрополь архаического и классического периода Волна 1 представляет собой один из важнейших архео-

логических памятников греческой колонизации Северного Причерноморья [Исследования..., 2023, с. 45]. Датированный серединой VI в. до н. э. – началом I в. до н. э., он расположен на Таманском полуострове Краснодарского края и находится на важных торговых путях через Керченский пролив. Некрополь имеет большое значение для изучения взаимодействия варварского и греческого населения этой территории. Археологические предметы как смешанного происхождения, так и явно греческого или варварского свидетельствуют о динамике взаимного проникновения культур.

Особый интерес представляют предметы из различных металлов, обладающие яркими технологическими особенностями, которые характеризуют различные ремесленные школы. Однако редкость и высокая ценность металлических находок требуют применения особых неразрушающих методов исследования. Одним из таких методов является нейтронная томография, позволяющая выявлять участки различных металлов или продуктов коррозии, а также скрытые особенности конструкции. Кроме того, данный метод предоставляет возможность оценить степень сохранности артефактов для правильного выбора стратегии консервации. Дополнительную информацию о фазовом составе образца может предоставить метод нейтронной дифракции, что еще больше расширяет возможности исследования культурного наследия.

Приборы и материалы. Эксперименты по нейтронной томографии проводились на установке TITAN [Fast mode..., 2024, p. 1], расположенной на первом горизонтальном канале исследовательского реактора ВВР-К в Институте ядерной физики в Алма-Ате, Казахстан. Параметр расходимости падающего пучка, который критически влияет на разрешение нейтронного изображения, определяется соотношением диаметра коллиматора (D) и расстояния от коллиматора до образца (L). В нашем эксперименте это соотношение составило $L/D = 350$, что обеспечивало высокую точность измерений. При расстоянии от образца до детектора, равном

35 мм, размытие нейтронного изображения достигало приблизительно 100 мкм.

Для получения нейтронных изображений использовался детектор с заменяемыми сцинтилляционными пластинами и ПЗС-камерой, что позволяло оптимизировать качество получаемых данных. Реконструкция трехмерных моделей осуществлялась на основе набора из 360 угловых проекций с шагом 0,5 градуса. Типичное время экспозиции для одного нейтронного изображения составляло 20 секунд, что позволяло получать достаточно детализированные снимки. Для качественной реконструкции использовался алгоритм Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT) в программном пакете SYRMEP Tomo Project, и выполнялось 150 итераций алгоритма SIRT для достижения оптимального результата. Визуализация и анализ реконструированных данных проводились с помощью программного обеспечения VGStudio MAX 2.2 (Volume Graphics, Гейдельберг, Германия), что обеспечивало удобный интерфейс для работы с объемными данными.

В дополнение к нейтронной томографии был исследован фазовый состав фрагментов зеркал на станции нейтронной порошковой дифракции ДИСК, расположенной на шестом горизонтальном экспериментальном канале реактора ИР-8 (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия). Анализ дифракционных данных проводился методом Ритвельда с использованием программы FullProf, что позволило достичь высокой точности в определении фазового состава. Также фазовый состав мелких фрагментов изучался методом рентгеновской дифракции на станции рентгеновского рассеяния Xeuss 3.0, разработанной французской компанией XENOXs, в лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия). Этот комплексный подход к исследованию материалов позволил получить более полное представление о структуре и свойствах образцов.

Обсуждение результатов. Фрагмент бронзового зеркала. Объем трехмерной

модели формируется из 12 910 499 вокселей, что соответствует объему 1,8 см³. Объем внутренних полостей составляет 55 908 вокселей, или 8 мм³. Анализ трехмерной структуры показывает, что металлическая часть зеркала практически не сохранилась в своем первоначальном объеме из-за высокого уровня коррозии.

Фрагмент железного меча. Объем трехмерной модели формируется из 40 250 000 вокселей, что соответствует общему объему 6 см³. Металлическая часть, не подверженная коррозии, составляет объем в 750 мм³ – 12,5 % от общего объема фрагмента меча. Внутренние полости, составляющие 2 % от общего объема, указывают на технологические особенности его изготовления, такие как методковки или отливки.

На спектрах рентгеновской дифракции фрагмента меча были обнаружены рефлексы, соответствующие нескольким фазам: железу (Fe) и оксидам железа (Fe₃O₄, Fe₂O₃). Интенсивность пиков железа на спектре, собранном с центральной части меча, выше, чем на спектре у края, что коррелирует с данными нейтронной томографии. Кубической фазе Fe₃O₄ соответствуют параметры кристаллической решетки $a = 8,39(3)$, $\alpha = 90^\circ$.

На нейтронных дифракционных спектрах фрагмента бронзового зеркала были обнаружены рефлексы, соответствующие меди и ее оксидам. Смещение параметров кристаллической решетки меди для различных участков зеркала подтверждает схожесть в технологии обработки металла. Содержание олова в сплаве зеркала составляет около 6 мас. %. Все мелкие фрагменты зеркала подверглись значительной коррозии, поэтому на спектрах рентгеновской дифракции видны лишь небольшие рефлексы меди и ее оксидов. Продукты коррозии представлены в основном купритом и атакамитом, что указывает на длительное воздействие влаги на артефакт.

Заключение. Таким образом, исследование трехмерных моделей этих металлических артефактов не только предоставляет информацию об их составе и структуре, но и открывает новые горизонты для по-

нимания технологий обработки металлов в древности. Сравнительный анализ данных о фрагментах железного меча и бронзового зеркала демонстрирует различные подходы к обработке и использованию

металлов в разные исторические эпохи, а также подчеркивает важность сохранения культурного наследия для будущих исследований.

Список источников

Исследования бронзовых зеркал к. VI – к. V вв. до н. э. из грунтового могильника Волна 1 на Азиатском Боспоре / И. А. Сапрыкина, Б. А. Бакиров, Л. Н. Гриценко (Соловьева), Р. А. Мимоход, Т. Ю. Шведчикова, Н. И. Сударев, С. Е. Кичанов, П. С. Успенский // МАИЭТ. 2023. Т. 28. С. 44–69.

Fast mode of neutron imaging at the TITAN facility / K. Nazarov, M. Kenessarin, B. Mukhametuly, S. Kichanov, R. Baitugulov // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing. 2024. Vol. 3020. № 1. P. 1–6.

Strobl M., Lehmann E. Neutron Imaging: From applied materials science to industry. Bristol, England: IOP Publishing, 2024. 452 p.