УДК 620.18, 671.4, 902/904

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕРЕБРО-СОДЕРЖАЩИХ МОНЕТ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Е. Ф. Шайхутдинова [1-3], Р. Х. Храмченкова [2, 3], А. Г. Ситдиков [2, 3]
[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
[2] Казанский (Приволжский) Федеральный университет,
[3] Институт археологии им. А.Х. Халикова Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Россия

В нумизматике наряду с традиционной информацией о номинале, весе, плотности, месте производства, правителе, большой интерес представляет динамика развития технологии производства монет и выявление закономерностей изменения номинала в зависимости от времени и места изготовления. Учитывая уникальность нумизматических артефактов, метод рентгеновской компьютерной томографии является хорошей альтернативой их исследования, так как не предполагает фрагментацию объектов. Однако в случае изучения тонких и протяженных форм возникает ряд специфических проблем, которые не позволяют получить полноценные снимки и трехмерные модели структуры. Данная статья посвящена методике исследования структуры серебросодержащего материала методом компьютерной томографии для реконструкции технологии их изготовления.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, технология изготовления, археологические серебряные монеты, Волжская Булгария

RECONSTRUCTION OF MANUFACTURING TECHNOLOGY SILVER-CONTAINING COIN BY X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY

E. F. Shaykhutdinova [1-3], R. Kh. Khramchenkova [2, 3], A. G. Sitdikov [2, 3]
[1] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
[2] Kazan Federal University,
[3] Institute of archaeology named after A.Kh. Khalikov. Tatarstan Academy of Science, Kazan, Russia

The great interest in numismatics is the dynamics of the coins production technology as well as with historical information about the nominal, weight, density, place of production, the ruler of. As well as the identification of laws of change of the nominal value depending on the time and place of manufacture. Considering the unique numismatic artifacts the computed tomography method is a good alternative their investigations, as the objects does not imply fragmentation. However, in the case of the study of thin and lengthy forms raises a number specific problems, which are not possible to obtain full images and three-dimensional model of the structure. This article deals with the method of investigation of the structure of the silver material by means of computer tomography for the reconstruction of their production technology.

Keywords: X-ray computer tomography, manufacturing technology, archaeological silver coins, Volga Bulgaria

Изучение древнего города Болгар подразумевает комплексное исследование историко-культурного, технологического и территориального происхождения археологических находок из цветных и благородных металлов. Монеты как исторический и культурный объект Волжской Болгарии являются индикатором ее широких торгово-экономических связей с регионами различной отдаленности. Изучение специфики производства монет

позволит определить особенности технологии изготовления в зависимости от их происхождения и времени хождения, а также закономерности их распространения в Волжской Болгарии как крупного средневекового торгового и культурного центра. Многолетние исследования нумизматического материала Болгарских городов большей частью затрагивали изучение химического состава и типологизации монет по историко-культурному происхождению.

Рентгеновская компьютерная томография (РКТ) относится к неразрушающим методам исследования внутренней структуры объекта путем его многократного просвечивания рентгеновским излучением в различных направлениях с последующей компьютерной обработкой проекционных данных на основе математических методов и алгоритмов [1]. В результате анализа объекта методом РКТ получаются трехмерные модели объекта в градации серого, и в дополнение к этому можно получить снимки разреза объекта в любой плоскости. Чем большую плотность имеет материал, тем светлее точка на снимке РКТ. Степень градации определяется физическими свойствами материала, и если имеется предварительная информация о составе образца, на основе визуальных данных пространственного распределения плотности серого цвета можно проводить качественный анализ его внутреннего состава и структуры.

Исследуемый нумизматический материал представляет собой фрагменты 20 монет - так называемые зияриды – 2 шт., мамуниды – 8 шт. и саманиды – 10 шт. Все монеты относятся к концу 10 – началу 11 вв. Предварительные исследования [2,3] химического состава выявили, что все они делятся на 5 групп:

- монеты с высоким содержанием серебра (более 70 %);
- биметаллические монеты системы Ag-Cu;
- монеты с низким содержанием серебра (менее 30 %);
- монеты системы Cu-Ag-Pb;
- латунная монета Cu-Zn-Sn.

Изучение структуры монет проводилось на базе промышленного рентгеновского микротомографа v|tome|x s 240 (GE Phoenix X-ray, Germany) (Казанский Федеральный университет, г. Казань). Томограф предназначен как для высокопроизводительной трехмерной компьютерной томографии, так и для двумерных радиографических исследований объектов весом до 10 кг с максимальными размерами 230x420 мм. Система имеет отдельную нанофокусную рентгеновскую трубку с отдельным высоковольтным генератором 180 КВ, а также отдельную микрофокусную рентгеновскую трубку с отдельным высоковольтным генератором 240 КВ.

В процессе изучения монетного материала методом РКТ были выявлены некоторые аспекты, которые не позволяют исследовать монету целиком. Это связано с инструментальными особенностями метода: при облучении объекта гамма-лучами выбирается определенная постоянная интенсивность луча, которая устанавливается оператором в зависимости от средней плотности материала и габаритных размеров образца. В процессе просвечивающей съемки образец вращается вокруг своей оси, поэтому в случае резкого перепада толщин 3-D модель исследуемого объекта отображается не корректно в силу следующих явлений:

- засветка «тонкой» части исследуемого образца в случае луча высокой интенсивности;
- отсутствие сигнала от «толстой» части исследуемого образца при недостаточной интенсивности излучения.

Также большое значение имеет равномерность показателя средней плотности материала внутренней структуры образца, так как различные химические элементы и их соединения обладают большим диапазоном ослабления гамма-излучения. Например, для энергии излучения в 100 кэВ коэффициент его ослабления при прохождении через флюорит составляет 0,63, медь – 3,94, серебро – 14,9, свинец – 62,6 [4]. Структура любого металлического сплава является неравномерной, так как всегда помимо основной матрицы содержит большой процент легирующих элементов, и этот аспект также значительно усложняет исследование внутреннего строения сплавов системы Ag-Cu.

Исходя из вышеизложенного, для обеспечения возможности изучения монетного материала методом РКТ возникла необходимость отбора образца небольшого размера с минимальным перепадом габаритных размеров (0,5 – 2 мм). Необходимо заметить также, что разрешение РКТ съемки напрямую зависит от размера исследуемо образца – чем меньше предмет, тем выше разрешение, и тем более детальная картина внутреннего пространства получается.

На рисунке 1 наглядно демонстрируется, что при высоком содержании серебра происходит рассеивание (поглощение) выходящего луча, поэтому по структуре четко определить можно только поры. Фазовый состав про-

сматривается нечетко. В биметаллических монетах структура прослеживается четко (рисунок 2), на снимке визуализируются и медная, и серебряная фазы. И соответственно при низком содержании серебра в медной матрице все внутренне строение монеты, включая пустоты, определяются более контрастно (рисунок 3).

Установить по снимку конкретный химический элемент по градации серого не представляется возможным без соответствующего специализированного программного обеспечения. С учетом предыдущих исследований химического состава белый цвет на снимке может обозначать, как серебро, так и свинец (рисунок 4). Так как плотность серебра и свинца отличаются друг от друга всего на 1 – 1,5 г/м^3 визуально разделить эти элементы на снимках РКТ практически невозможно. Если в общей массе образцов исследуется образец другого состава, например, сплав системы Cu-Zn-Sn (рисунок 5, «черный» дирхем), визуально отличить ее от серебряной на снимке РКТ невозможно.

В результате проведенной РКТ для каждой монеты получены трехмерные изображения с возможностью пространственного вращения в режиме реального времени. Как было сказано выше, метод основан на суммировании проходящего через образец рентгеновского сигнала, который в результате компьютерной обработки выявляет структуру плотности по градации серого. Принимая во внимание, что состав монет предполагает содержание в них определенного количества серебра и меди, в качестве более плотного металла принимается серебро, в качестве менее плотного – медь. При интерпретации результатов авторы учитывали данные по элементному составу [2, 5].

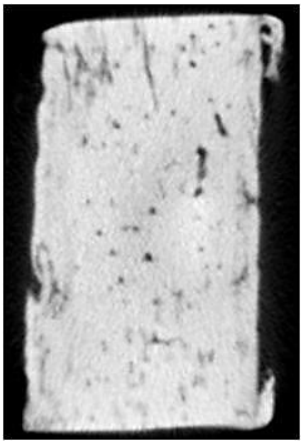


Рисунок 1 – Микроснимок структуры монеты с высоким содержанием серебра

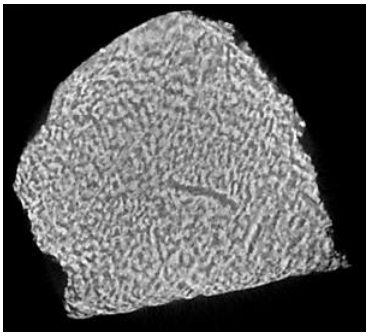


Рисунок 2 – Микроснимок структуры биметаллической монеты

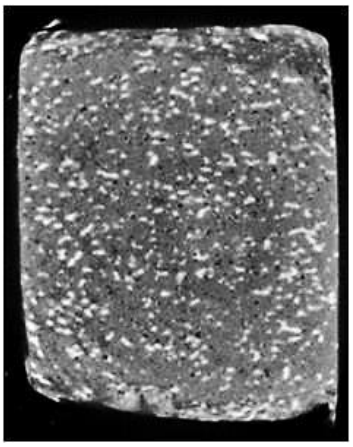


Рисунок 3 – Микроснимок структуры монеты с низким содержанием серебра

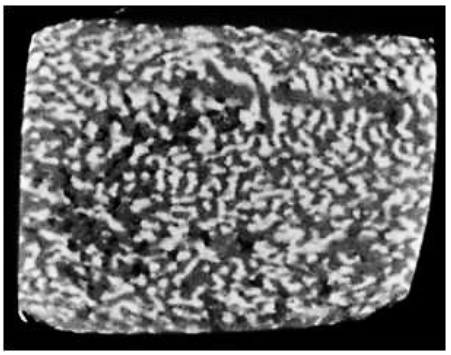


Рисунок 4 – Микроснимок структуры монеты системы Cu-Ag-Pb

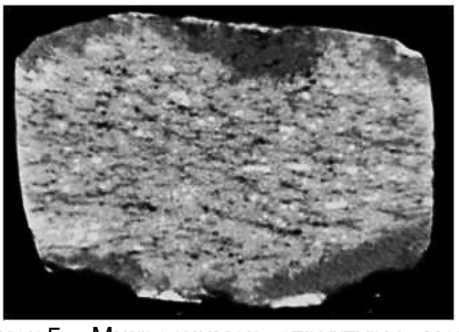


Рисунок 5 – Микроснимок структуры монеты системы Cu-Zn-Sn с оловянным покрытием

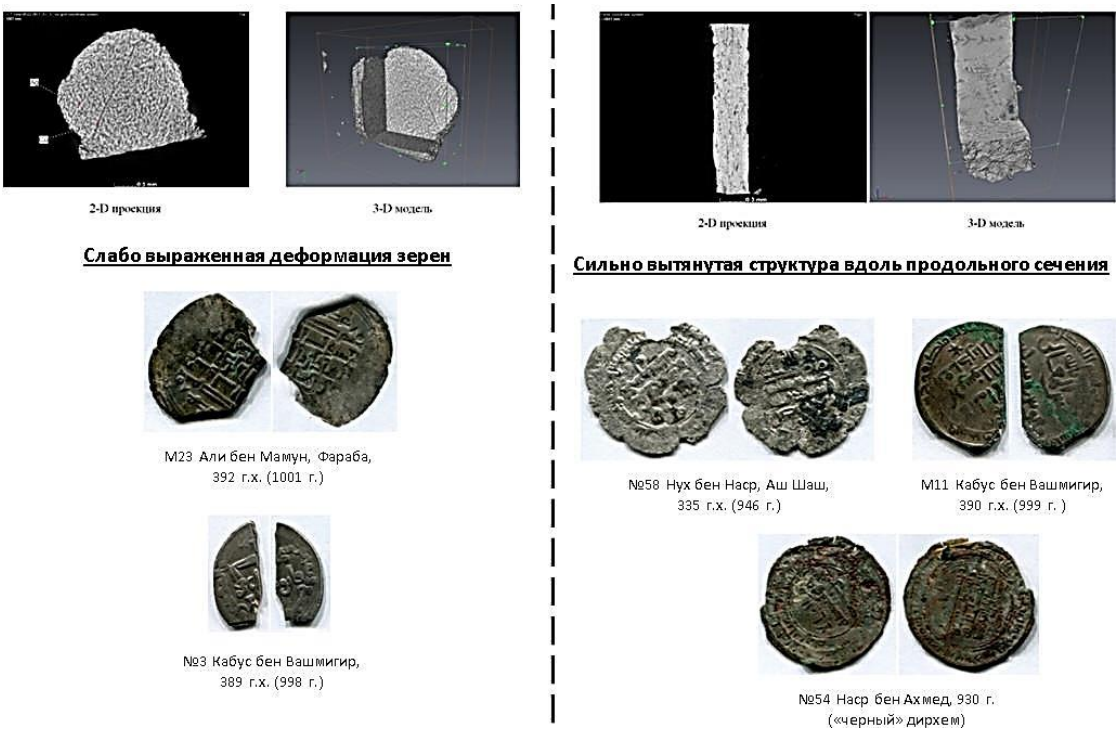


Рисунок 6 – Монеты, чеканенные из заготовок, полученных обработкой давлением

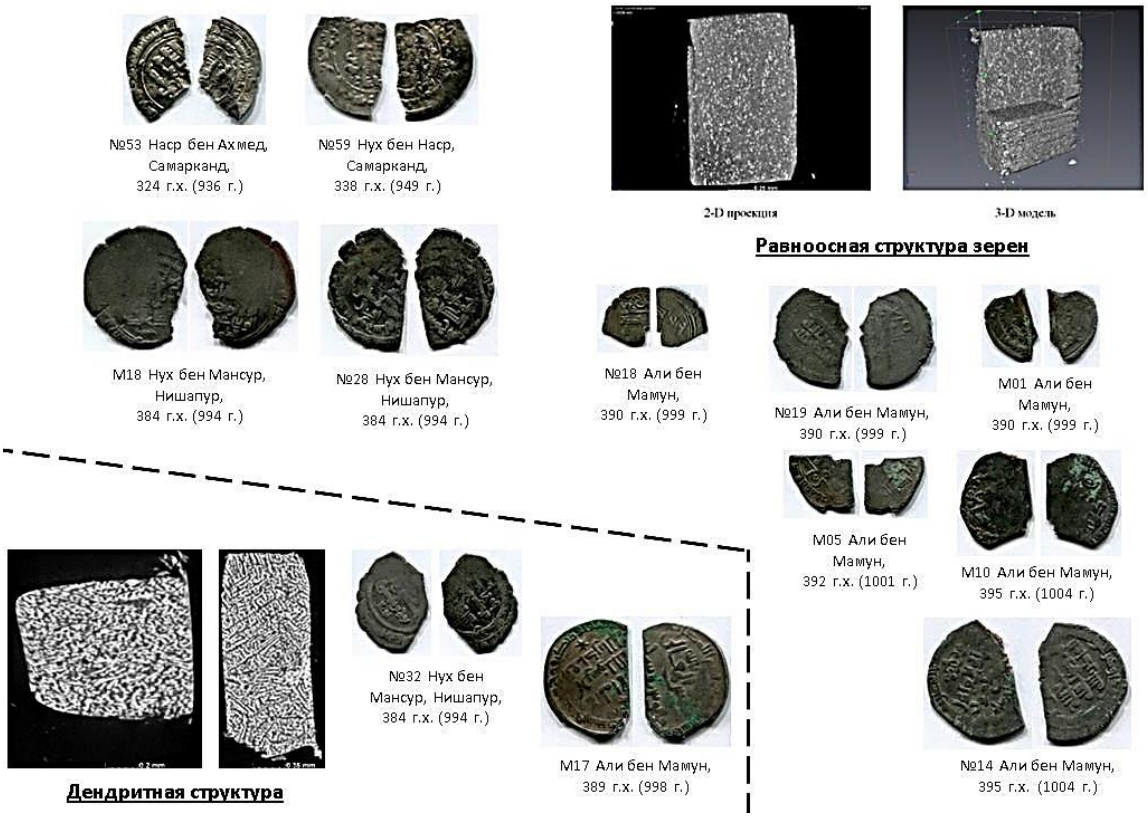
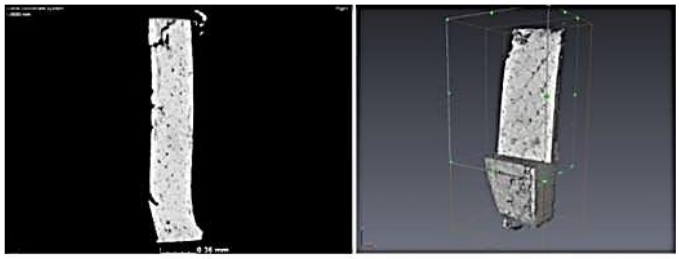


Рисунок 7 – Монеты из заготовок, полученных литьем



2-D проекция 3-D модель

Трехслойная литая структура

№150 Мансур бен Нух, Бухара, 359 г.х. (969 г.)

№124 Мансур бен Нух, Самарканд, 363 г.х. (973 г.)

№68 Нух бен Мансур, Бухара, 366 г.х. (976 г.)

Рисунок 8 – Монеты литые со слоистой структурой

Результаты РКТ представляются в виде съемки трехмерного сканирования вдоль осей параллельно плоскостям и соответствующих фотографий. Снимки изучаемых объектов представляют собой фотографии структуры в градации серого цвета с увеличением ×100…200. Широкий разброс кратности увеличения связан с индивидуальными структурными размерами составляющих монетного материала - размерами фаз.

Исследование 3D моделей и 2D снимки показали, что в целом по технологии изготовления заготовок для чекана монеты можно разделить на 5 групп:

– Монета со слабо выраженными признаками обработки металла давлением (рисунок 6).

– Монета с явными признаками обработки металла давлением (рисунок 6).

– Монета с явными признаками литья (равноосная структура) (рисунок 7).

– Монета с явными признаками литья (дендритная структура) (рисунок 7).

– Трехслойная литая монета (рисунок 8).

Проведенные исследования методом рентгеновской компьютерной томографии позволяют сделать следующие выводы:

– На сегодняшний день в качестве неразрушающего метода РКТ не может быть использован в связи с плоской структурой монет, что влечет за собой неравнозначный путь рентгеновского луча вдоль плоскостей монеты. Решить данную проблему можно путем разработки специального компьютерного сопровождения рентгеновской съемки плоских объектов.

– Для полноценного изучения монет методом РКТ необходим отбор образца размерами около 1 мм^3 с равномерными величинами по осям. Эта необходимость ограничивается двумя аспектами – невозможность отбора материала от целых артефактов и сложность отбора представительной части объекта.

– Исследование РКТ образцов из сплавов позволяют определять качественный состав структур со значимыми значениями концентраций металлов, которые должны сильно различаться по плотности. Как показал опыт данной работы, металлы, содержание которых меньше 5 – 10 % не выявляются, т. е. на данный момент по градации серого невозможно определить состав сплава.

– РКТ данные не позволяют идентифицировать металлические образования. Например, исходя из результатов представленных исследований, невозможно различить по оттенкам серого медную составляющую

сплава и образования из окисленного серебра – обе компоненты имеют практически не различающийся цвет.

– Все полученные снимки подтверждают или уточняют данные сканирующей электронной микроскопии и эмиссионного спектрального анализа, но не позволяют так подробно оценить структуру и состав послойно, как СЭМ [2], и тем более выявить микроэлементы, как для ЭСА.

– Одним из наиболее негативных аспектов метода РКТ является его высокая стоимость – в 5 раз дороже СЭМ и в 10 раз ЭСА.

Исходя из выше перечисленного, предполагается нецелесообразным применение этого метода для изучения монетного материала, в той же мере, как и любых плоских металлических объектов.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15-46-02179 «Мультидисциплинарное исследование средневековых серебряных монет археологических памятников Волжской Булгарии».

Список литературы

1. Прусов Е.С. Компьютерная томография для задач трехмерного материаловедения // Fundamental Research. № 5. 2015. С. 318-323.

2. Храмченкова Р.Х., Беговатов Е.А., Шайхутдинова Е.Ф., Ситдиков А.Г. Предварительные результаты археометрических исследований серебряных монет 10 века Волжской Болгарии // Поволжская Археология. 2015. № 3 (13). С. 176-188.

3. Беговатов Е.А., Лебедев В.П., Храмченкова Р.Х. Химический состав серебряных монет X века I Семеновского селища (Республика Татарстан) // Поволжская археология. №3(5). 2013. С. 169-174.

4. Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Хозяинов М.С. Первая всероссийская научная конференция "Практическая микротомография" // Современная рентгеновская микротомография геоматериалов. Казань. 2013. С. 10-21.

5. Khramchenkova R., Begovatov E., Shaykhutdinova E., Safina I., Sitdikov A. Investigation of silver coins of the 10th century Semenovsky Villages (Volga Bulgaria) // Proceedings of the 1st International Conference on Metrology for Archaeology. Benevento - Italy - October 21 - 23, 2015. Pp. 407-412.

***Шайхутдинова Евгения Флюровна*[1, 3]** *– к.т.н., доцент[1], старший научный сотрудник[2]*
***Храмченкова Резида Хавиловна*[2, 3]** *– к.ф.-м.н., старший научный сотрудник[2], заведующая отделом[3]*
***Ситдиков Айрат Габитович*[2, 3]** *– д.и.н., заведующий кафедрой[2], директор[3]*

[1] ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ)
[2] Казанский (Приволжский) Федеральный университет
[3] Институт археологии им. А.Х. Халикова Академии наук Республики Татарстан
г. Казань, Россия