

На правах рукописи



Мурашев Михаил Михайлович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ИР-8 И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

Специальность: 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Научный руководитель: **Эм Вячеслав Терентьевич** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела нейтронных экспериментальных станций НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Рощупкин Дмитрий Валентинович** – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук, г. Черноголовка;

Губкин Андрей Федорович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией нейтронных исследований вещества Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.

Защита состоится 21 мая 2026 г., начало в 15:00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.01 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
02.1.003.01, к.ф.-м.н.



А.В. Емельянов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Неразрушающие методы визуализации с использованием рентгеновских лучей и нейтронов зарекомендовали себя во многих областях: от медицины до материаловедения. В случае с изучением структуры материалов указанные методы визуализации дополняют друг друга и позволяют получить взаимодополняющую информацию. Чувствительность нейтронов к легким атомам в совокупности с высокой проникающей способностью в большинство металлов позволяет находить очаги коррозии или наводораживания внутри массивных металлических изделий. Если рассматривать нейтрон, как волну, то длина волны тепловых нейтронов составляет единицы ангстрем, что сравнимо с межплоскостными расстояниями для кристаллических структур многих материалов. Поэтому выполняются условия для дифракции нейтронов на кристаллической структуре. В случае нейтронной визуализации дифракция тепловых нейтронов (дифракционный контраст) позволяет распознавать особенности строения поликристаллических объектов, такие как объемное распределение фаз, визуализация областей с преимущественной ориентацией зерен и т.д.

Одним из первых приборов нейтронной визуализации в России был созданный в 2014 г. на исследовательском реакторе ИР-8 (НИЦ «Курчатовский институт») нейтронный томограф. Прибор располагался на монохроматическом нейтронном пучке трехосного спектрометра АТОС. Довольно быстро применение методов нейтронной визуализации зарекомендовало себя в таких областях, как материаловедение и изучение объектов культурного наследия, где неинвазивность метода наиболее актуальна. В приборах нового поколения помимо классической визуализации, основанной на поглощении нейтронного излучения, предусмотрена возможность использования монохроматических нейтронов с переменной длиной волны (энергодисперсионная визуализация),

что значительно расширяет возможности метода для исследований в области материаловедения.

В связи с высокой потребностью методов нейтронной визуализации для решения научных и прикладных задач в таких областях как материаловедение, археология, геология, изучение объектов культурного наследия очевидной стала задача создания современных специализированных станций, как на полихроматическом нейтронном пучке, так и на монохроматическом с изменяемой длиной волны.

Цели и задачи

Основной целью диссертационной работы являлась разработка и создание современной специализированной экспериментальной базы по нейтронной визуализации на стационарном исследовательском реакторе ИР-8, применение нейтронной визуализации для прикладных исследований в области материаловедения, аддитивных технологий и изучения объектов культурного наследия.

Для достижения цели диссертационной работы требовалось выполнение конкретных задач методического и научного характера:

1. Осуществить ввод в эксплуатацию созданной на исследовательском реакторе ИР-8 (НИЦ «Курчатовский институт») станции нейтронной визуализации ДРАКОН с монохроматическим нейтронным излучением с изменяемой длиной волны;
2. Экспериментально подтвердить возможность использования методики дифракционно-контрастной визуализации на станции ДРАКОН;
3. Разработать и создать компактный прибор нейтронной визуализации на полихроматическом нейтронном пучке ПОНИ с улучшенным пространственным разрешением;

4. Методами нейтронной визуализации изучить внутреннюю структуру важных для промышленности металлических образцов, в том числе полученных с помощью современных аддитивных технологий;

5. Неразрушающими методами нейтронной визуализации изучить внутреннюю структуру объектов культурного наследия, которые трудно или невозможно изучить рентгеновским методом.

Научная новизна

1. Впервые на территории России и стран СНГ введена в эксплуатацию специализированная станция нейтронной визуализации с использованием монохроматических нейтронов с изменяемой длиной волны.

2. Создан компактный прибор нейтронной визуализации на касательном канале исследовательского реактора ИР-8 на полихроматических нейтронах с высоким пространственным разрешением.

3. Впервые показана возможность визуализации дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами в стали методом нейтронной визуализации на монохроматических нейтронах.

4. Методом нейтронной визуализации впервые изучена структура изделий и материалов, в том числе градиентных, полученных методами аддитивных технологий.

5. Методом нейтронной визуализации изучены уникальные археологические объекты: нательные кресты-энколпионы и терракотовая скульптура.

Практическая значимость

В результате проделанной работы в НИЦ «Курчатовский институт» на исследовательском реакторе ИР-8 введена в эксплуатацию единственная на сегодняшний день на территории России и стран СНГ экспериментальная станция нейтронной визуализации ДРАКОН на монохроматических нейтронах с переменной длиной волны с возможностью визуализации дифракционного

контраста в кристаллических образцах, и создан компактный прибор ПОНИ для нейтронной визуализации на полихроматическом нейтронном излучении с высоким пространственным разрешением.

Научная и практическая значимость диссертационной работы определяется также тем, что созданные новые специализированные станции нейтронной визуализации позволяют решать широкий круг актуальных научных и прикладных задач в таких областях знаний как материаловедение, геология, археология и палеонтология. Станция ДРАКОН с 2016 года успешно работает в пользовательском режиме и входит в состав Уникальной научной установки нейтронного исследовательского комплекса ИР-8 (УНУ НИК ИР-8).

Научные положения, выносимые на защиту

1. Станция нейтронной визуализации ДРАКОН, с реализованной возможностью использования монохроматического нейтронного излучения с изменяемой длиной волны ($\lambda=1.8-5 \text{ \AA}$), позволяет проводить исследования внутренней структуры металлических образцов с применением методики дифракционно-контрастной визуализации.

2. Компактный стенд нейтронной визуализации ПОНИ обеспечивает высокое пространственное разрешение (до 40 мкм) при низком уровне гамма-фона и быстрых нейтронов.

3. С помощью монохроматического пучка нейтронов с переменной длиной волны на станции ДРАКОН визуализирован дифракционный контраст между одинаковыми по химическому составу и близкими по кристаллической структуре ферритной и мартенситной фазами в стали.

4. В образцах аддитивных производств, изготовленных методом прямого лазерного выращивания из функционально-градиентных материалов, формируются макро- и микроскопические дефекты в зоне градиентного перехода.

5. В стальных пластинах, изготовленных из сталей AISI 316L и AISI 410 методом прямого лазерного выращивания возникает сильно выраженная неоднородная текстура.

Апробации результатов

Достоверность полученных в данной работе результатов подтверждается воспроизводимостью результатов экспериментов, проведенных на созданных приборах нейтронной визуализации, сопоставлением с известными результатами и соответствием результатам других авторов.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены в 25 докладах на следующих российских и международных конференциях: XV Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», Москва, ИМЕТ РАН (октябрь 2018 г.), Школа ПИЯФ по Физике конденсированного состояния, Сестрорецк, НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (март 2018, 2019, 2020 г.), Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2018), Санкт-Петербург, СПбГУ (2018 г.), Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2021, РНИКС-2023), Екатеринбург, ИФМ УрО РАН (сентябрь 2021, 2023 г.), Восьмая Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», Москва, НИТУ «МИСиС» (ноябрь 2019 г.), V международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», Москва, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (март 2019 г.), European Conference on Neutron Scattering (ECNS-2019), Санкт-Петербург (июль 2019 г.), Второе международное рабочее совещание «Применение ядерно-физических методов для исследования объектов культурного наследия», Казань, КФУ (октябрь 2021 г.), Курчатовский форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Курчатов ФСНЭ), Москва, НИЦ «Курчатовский институт» (октябрь 2023, 2024, 2025 г.), XXXV Уральская конференция «Физические

методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», Екатеринбург, ИФМ УрО РАН (март 2024 г.), Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2025), Томск, ТПУ (сентябрь 2025 г.).

Основное содержание работы отражено в 8 научных работах, из них 8 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (см. ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ).

Кроме того, по части результатов, представленных в данной работе, соискатель в составе коллектива авторов был удостоен звания лауреата премии имени И.В. Курчатова за лучшую работу в области инженерных и технологических разработок 2021 г.

Личный вклад автора

1. Автор внес определяющий вклад в работы по введению в эксплуатацию станции нейтронной визуализации ДРАКОН.

2. Автором разработана новая методика визуализации дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами в стали, которая была реализована на станции ДРАКОН.

3. Автор принимал активное участие в разработке и последующем создании прибора нейтронной визуализации на полихроматическом нейтронном излучении ПОНИ с необходимыми характеристиками пространственного разрешения.

4. Автор проводил все эксперименты и интерпретировал результаты для всех исследований, представленных в диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии, общий объем диссертации 190 страниц, включая 85 рисунков и 8 таблиц. Библиография включает 164 наименования на 18 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность разработки и создания современной экспериментально-методической базы по нейтронной визуализации на стационарном исследовательском реакторе ИР-8, определены цель и задачи диссертационной работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, представлен список публикаций по теме диссертации, а также сведения об апробации работы.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ, ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА И ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ. В первой главе представлено детальное описание методов нейтронной радиографии, томографии и дифракционно-контрастной визуализации.

Нейтронная визуализация – это общий термин, используемый для описания процесса формирования изображения с помощью нейтронного излучения. Когда излучение проходит через объект, оно взаимодействует с веществом и теряет свою интенсивность. Потеря интенсивности для нейтронов определяется законом Ламберта-Бера:

$$I(x) = I_0 e^{-\Sigma_t x} = I_0 e^{-N\sigma_t x}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность падающего излучения, $I(x)$ – интенсивность прошедшего излучения, N – количество атомов, σ_t – это полное макроскопическое сечение, x – толщина среды. Прошедшие сквозь образец нейтроны регистрируются детектором, формируя плоскую теневую проекцию объекта (радиографическое изображение) [1]. Радиографическое изображение в общем случае представляет собой проекцию изменения плотности и/или толщины образца. Информация об этом интегрируется вдоль падающего пучка на радиографическом изображении,

что не позволяет достоверно ее различить. Однако комбинация нескольких проекционных (радиографических) изображений, полученных под разными углами, может быть использована для получения информации о полном объеме объекта. Этот метод известен как компьютерная томография. Информация о поперечном сечении извлекается математически с использованием различных методов реконструкции.

Методы традиционной нейтронной визуализации основываются на ослаблении нейтронного излучения в среде для формирования изображения, однако в последнее время всё чаще используются другие методики, основанные на дифракционном контрасте. Так как тепловые нейтроны имеют длину волны де Бройля порядка нескольких ангстрем, что соответствует межплоскостному расстоянию для большинства кристаллических структур, для поликристаллических образцов с изменением длины волны падающих на образец нейтронов полное сечение взаимодействия изменяется скачкообразно (брэгговские скачки). Положение брэгговских скачков определяется межплоскостным расстоянием $2d_{hkl}$ отражающих плоскостей и зависит от кристаллической структуры материала. Для различных кристаллических структур в поликристаллическом образце можно подобрать длину волны нейтронов таким образом, чтобы получить контраст между ними, даже при одинаковом химическом составе. Это открывает широкий круг возможностей для визуализации областей с преимущественной ориентацией зерен и распределения фаз в исследуемых образцах [A2]. Такая методика получила название дифракционно-контрастная визуализация.

Современные методы нейтронной визуализации стали универсальным инструментом во многих областях науки. Диапазон применений включает в себя самые разнообразные направления исследований: от гражданского строительства до исследований топливных элементов, от геологии и исследований физиологии растений до реакторного материаловедения, от археологии и палеонтологии до медицинских исследований.

Чтобы охватить наибольший круг решаемых задач, необходимо использовать в исследованиях, как монохроматические, так и полихроматические пучки нейтронов. Монохроматизация нейтронного пучка ведет к серьезной потере в интенсивности, что в свою очередь не позволяет достичь высокого пространственного разрешения прибора. По этой причине в ведущих нейтронных центрах, как правило, имеются несколько приборов нейтронной визуализации, как на монохроматическом нейтронном пучке для решения задач в области материаловедения, так и на полихроматическом с высоким пространственным разрешением.

ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА РЕАКТОРЕ ИР-8. Во второй главе диссертационной работы представлено детальное описание и основные характеристики введенной в эксплуатацию станции нейтронной визуализации ДРАКОН и стенда нейтронной визуализации ПОНИ.

Станция ДРАКОН (рисунок 1) введена в эксплуатацию в 2016 г. Прибор предназначен для визуализации макроструктуры объектов методами нейтронной радиографии и томографии с субмиллиметровым пространственным разрешением. Станция является единственным прибором в России и одним из восьми приборов в мире, где реализована возможность использования монохроматического нейтронного излучения в широком диапазоне длин волн ($\lambda=1.8-5 \text{ \AA}$). Станция позволяет работать на одном из трех нейтронных пучках: двух монохроматических (с постоянной и переменной длиной волны) и полихроматическом. В качестве устройства монохроматизации используется блок двухкристального монохроматора [2]. Для высокоточного перемещения исследуемого образца и детектора относительно выходных нейтронных каналов и во время проведения экспериментов на станции ДРАКОН используется 7-осевой силовой модуль с грузоподъемностью до 100 кг [A1].

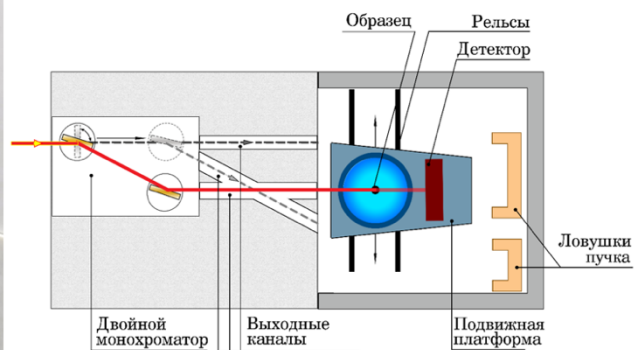


Рисунок 1 – Станция нейтронной томографии ДРАКОН и оптическая схема прибора

Оптическая схема прибора была подобрана таким образом, чтобы обеспечить баланс пространственного разрешения и плотности потока нейтронов на месте образца, так как использование монохроматического нейтронного излучения сильно ограничивает получаемую плотность потока нейтронов. Таким образом оптическая схема прибора позволяет достичь высокой интенсивности при среднем пространственном разрешении (~ 200 мкм). На станции ДРАКОН предусмотрен вывод и полихроматического нейтронного пучка высокой интенсивности, что позволяет проводить in-situ исследования.

На сегодняшний день станция ДРАКОН остается востребованной для проведения экспериментов в пользовательском режиме. Однако невысокое пространственное разрешение станции сильно ограничивает её возможности для решения многих современных актуальных задач. Поэтому возникла задача создать экспериментальный прибор нейтронной томографии высокого пространственного разрешения на полихроматическом нейтронном излучении, который в комплексе со станцией ДРАКОН позволит существенно расширить круг задач, которые можно решить методами нейтронной визуализации на реакторе ИР-8.

В 2021 году был создан стенд нейтронной визуализации ПОНИ. Для экспериментального стенда была выбрана классическая оптическая схема с

расходящимся коллиматором, реализованная на большинстве приборов в мировых нейтронных центрах. Общая оптическая схема прибора показана на рисунке 2. Пучок нейтронов формируется коллимирующей сборкой, расположенной внутри канала γ . Она представляет из себя набор ограничителей, с увеличивающимся по ходу нейтронного пучка диаметром отверстий.

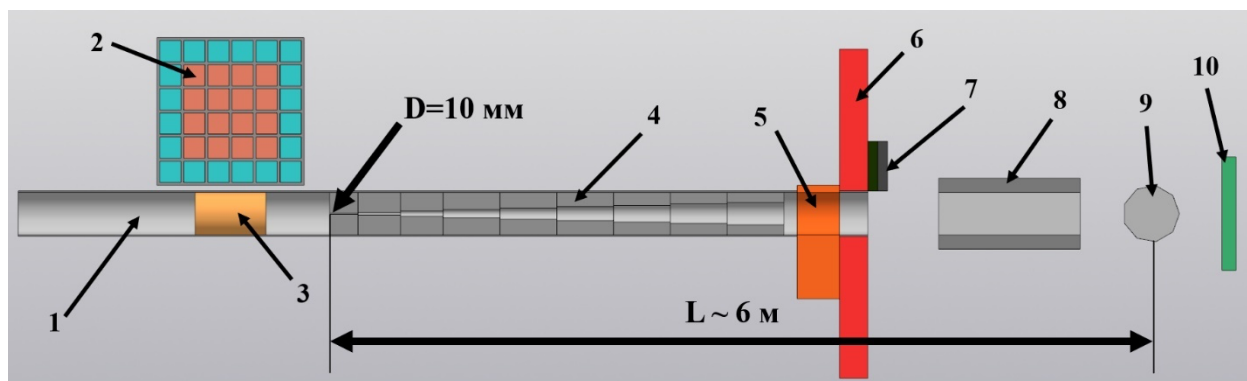


Рисунок 2 – Оптическая схема экспериментального стенда нейтронной томографии ПОНИ: 1 – горизонтальный экспериментальный канал №7, 2 – активная зона реактора, 3 – бериллий, 4 – набор ограничителей в сборке, 5 – шибер, 6 – биологическая защита реактора, 7 – быстрый шибер, 8 – ограничитель, формирующий нейтронный пучок на выходе, 9 – позиция образца, 10 – детектор

Благодаря расположению стенда на касательном канале и выбранной оптической схеме, удалось достичь высокого пространственного разрешения. На сегодняшний день на станции ДРАКОН и стенде ПОНИ установлены аналогичные позиционно-чувствительные детекторы непрямо́й регистрации с собственным пространственным разрешением ~ 200 мкм. Однако в ходе аттестационных экспериментов было показано, что при установке нового детектора на стенд ПОНИ можно достичь пространственного разрешения ~ 40 мкм. Такое значение пространственного разрешения соответствует ведущим мировым приборам нейтронной визуализации.

ГЛАВА 3. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИК НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА СТАНЦИИ ДРАКОН И СТЕНДЕ ПОНИ.

В третьей главе представлены результаты первых тестовых экспериментов на станции

ДРАКОН и экспериментальном стенде ПОНИ, демонстрирующие возможности созданных установок.

Показаны первые результаты исследований стальных образцов с использованием методики дифракционно-контрастной визуализации, демонстрирующие главную особенность станции ДРАКОН. Впервые показана возможность визуализации дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами в стали, при их одинаковом химическом составе, плотности и близких кристаллических структурах, методом нейтронной визуализации на монохроматических нейтронах (рисунок 3).

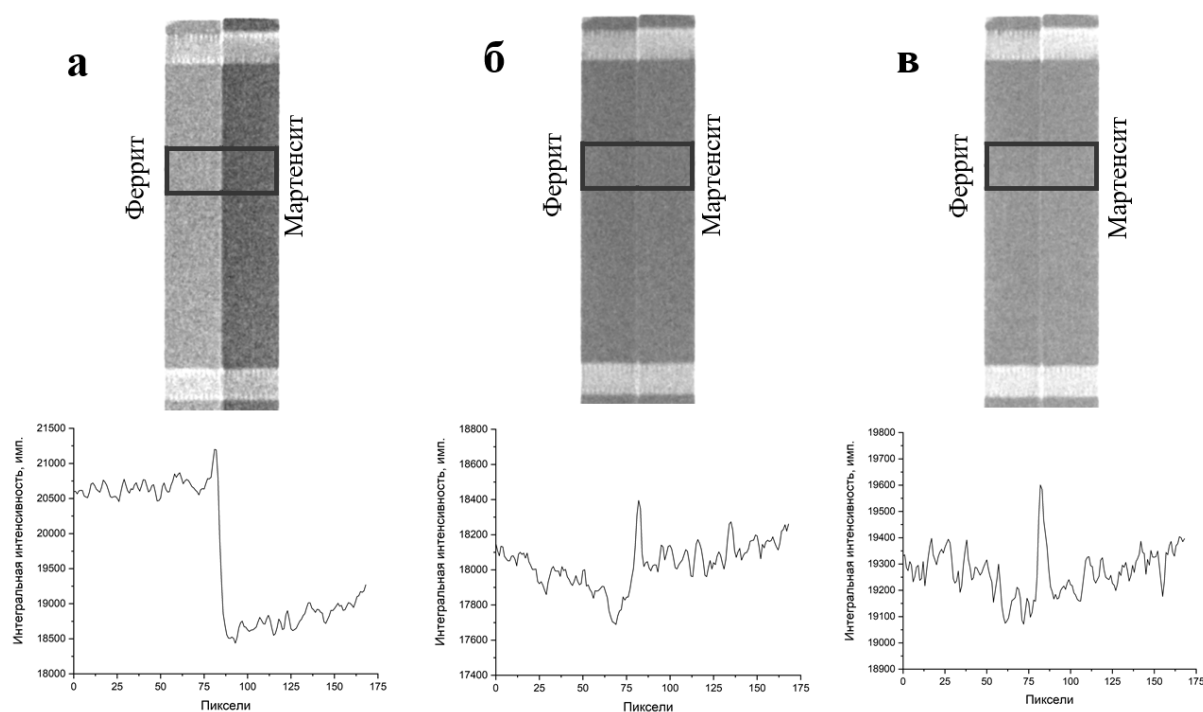


Рисунок 3 – Радиографические изображения исследуемых образцов. а – получено при длине волны 4.1 Å, б – при длине волны 2.86 Å, в – при длине волны 3.7 Å. (Снизу представлены профили интенсивности, взятые по выделенной области)

Исследование пространственного распределения ферритной и мартенситной фаз в сталях с использованием томографии на монохроматических нейтронах может помочь в решении задач, связанных с технологией изготовления и термообработки ответственных изделий из углеродистых сталей [A2].

Продемонстрирована взаимодополняемость экспериментальных данных, полученных на полихроматическом и монохроматическом пучках. Разработана методика минимизации ослабления нейтронов образцом со сложной симметричной внутренней структурой, основанная на его геометрии. Разработана методика радиографической съемки габаритных объектов с возможностью дальнейшей их томографической обработки. В рамках данной методики была разработана программа для съемки габаритных объектов в среде программирования LabView и реализован алгоритм сшивки радиографических изображений с последующей математической обработкой в программном комплексе ImageJ. Представлены возможности высокоинтенсивного полихроматического нейтронного пучка станции ДРАКОН в проведении in-situ исследований динамических процессов на примере визуализации кристаллизации галлия.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ. В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты исследований металлических изделий аддитивных производств, показаны возможности методов нейтронной визуализации, как с точки зрения неразрушающего контроля, так и качественного определения особенностей текстуры металлических образцов.

Аддитивные технологии (АТ) позволяют значительно уменьшить материалоемкость, трудоемкость и время изготовления деталей по сравнению с традиционными технологиями, основанными на удалении первичного материала (точение, фрезерование, шлифование, строгание).

Аддитивные технологии, генерируют специфические дефекты, такие как высокие остаточные напряжения, микрополости и сложная неоднородная текстура, обусловленные послойным синтезом, большим градиентом температур и высокой скоростью нагрева/охлаждения. Микро- и макродефекты напрямую влияют на ключевые характеристики материалов и их

эксплуатационные свойства. Изучение внутренней структуры металлических изделий, полученных методами АТ, является критически важным для обеспечения их функциональной надежности и эксплуатационных требований. Зачастую для неразрушающего контроля используют метод гамма томографии. Однако для исследования габаритных металлических изделий (с размерами от ≈ 20 мм в направлении просвечивания) лучше подходят методы нейтронной визуализации благодаря более высокому пространственному разрешению. А возможность визуализации дифракционных эффектов на монохроматическом пучке позволяет получить информацию о пространственном распределении фаз и текстуре в материале изделий.

Использование аддитивных технологий позволяет создавать совершенно новый перспективный вид изделий на основе функционально-градиентных материалов (ФГМ), свойства которых плавно изменяются в пространстве в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик готового изделия. Такие материалы находят применение в аэрокосмической отрасли, медицине и других высокотехнологичных сферах.

Приведены результаты исследований 4-х образцов, полученных в Сколковском институте науки и технологий методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ), с разными вариантами чередования слоев (рисунок 4).

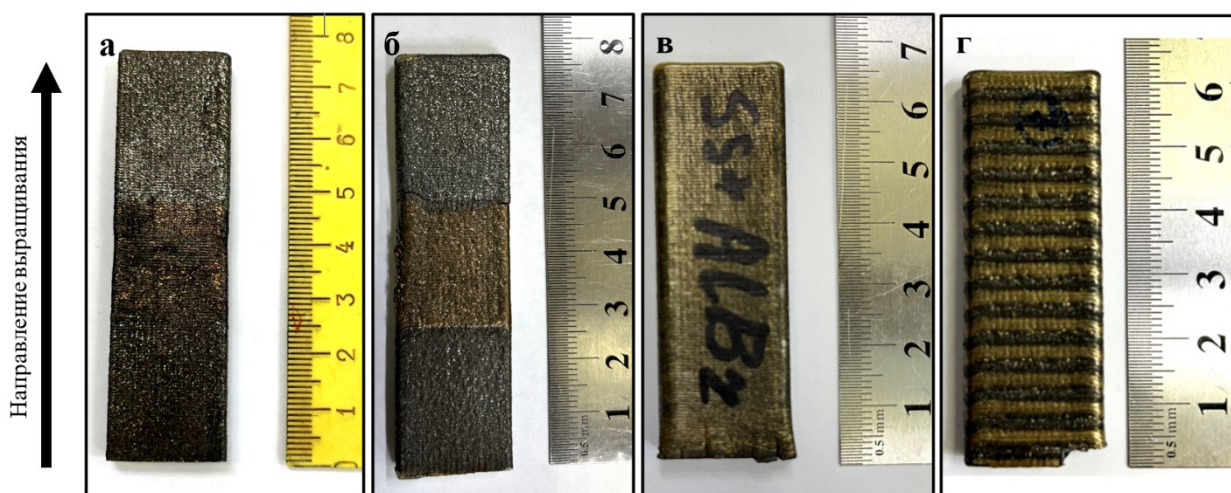


Рисунок 4 – Образцы ФГМ, полученные методом ЛПВ, стрелкой обозначено направление выращивания

В качестве материалов для образцов использованы порошки нержавеющей стали марки 316L и алюминиевой бронзы Пр-БрАЖ9,5-1. Все 4 образца из ФГМ были исследованы на экспериментальном стенде ПОНИ. Образец А и Г дополнительно исследовались на станции ДРАКОН с использованием монохроматического нейтронного излучения.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что изготовление деталей по технологии ПЛВ с текущим температурным и скоростным режимом является неэффективным в отношении аустенитной стали 316L. Наличие областей с ярко выраженной преимущественной ориентации зерен не позволит спрогнозировать механические свойства готового изделия. При печати алюминиевой бронзой (БрАЖ9,5-1) таких областей не наблюдается.

Следует сделать заключение, что стратегия резкого перехода [3, 4] в технологии ПЛВ является неэффективной. Она приводит к образованию макро- и микроскопических дефектов в случае объединения больших (порядка нескольких десятков миллиметров) зон материалов с существенно отличающимися физико-механическими характеристиками (например, коэффициент термического расширения), таких как сталь и бронза, в т.ч. имеющих метастабильный провал смешиваемости [5]. Зона градиентного перехода является местом наибольшей концентрации дефектов (рисунок 5) ввиду резкого изменения модуля упругости и коэффициента линейного температурного расширения при переходе от одного материала к другому [3]. Следует отметить, что трещинообразование преимущественно происходит не в первой зоне градиентного перехода, более близкой к подложке, а во второй. Это свидетельствует о существенном влиянии термической истории на качество формирования изделия и об отличии схем печати «сталь поверх бронзы» и «бронза поверх стали». Использование техники чередующихся слоёв [3, 4] позволяет достичь хорошего перемешивания материалов, что увеличивает гомогенность изделия и предотвращает формирование внутренних дефектов. Однако в таком случае в образце не формируются макроскопические зоны из

разных материалов, имеющих существенно отличающиеся физико-механические характеристики. Подобные сплавы с чередующимися слоями имеют как свой собственный спектр применений, так и могут быть использованы в качестве переходных зон в ФГМ [5].

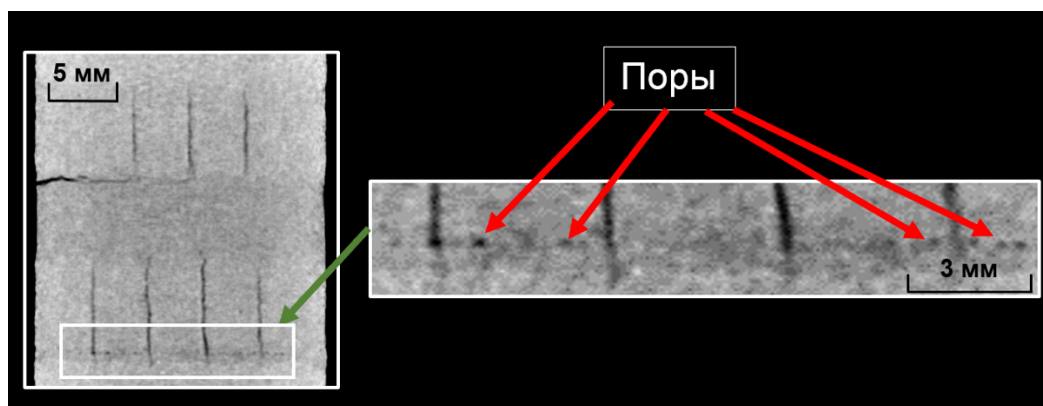


Рисунок 5 – Томографическое изображение образца А. В выделенной области видны поры вдоль одного слоя печати на границе градиентного перехода

Показано, что использование монохроматических и полихроматических нейтронных пучков позволяет получить взаимодополняющую информацию о внутренней структуре изделий (рисунок 6). Для технологии ПЛВ экспериментально продемонстрированы недостатки метода непосредственного присоединения применительно к ФГМ. Они выражаются в интенсивном формировании макро- и микроскопических дефектов в зоне градиентного перехода, проявляющихся тем интенсивнее, чем более удалена данная зона от подложки.

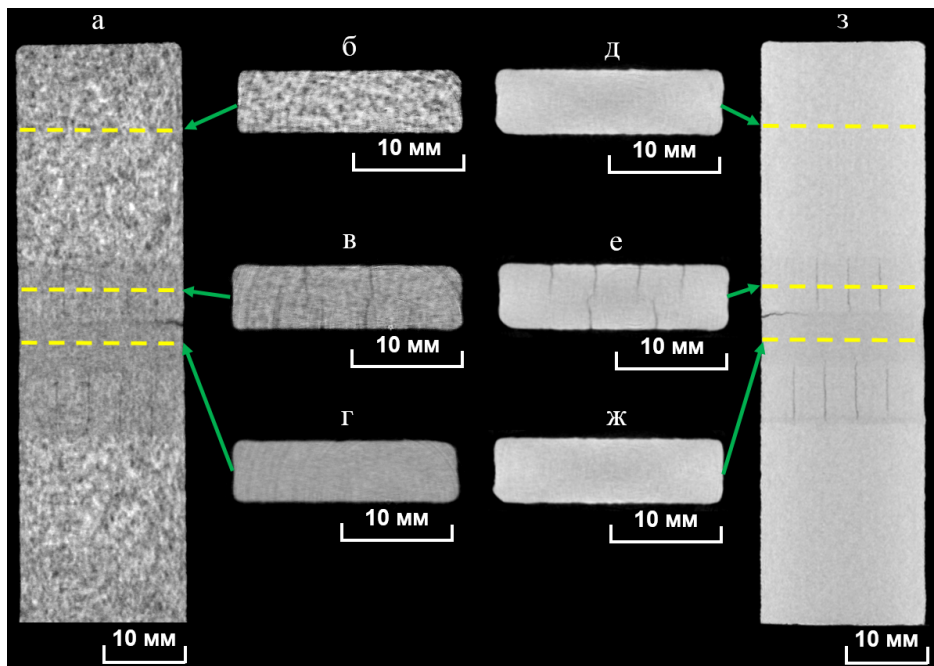


Рисунок 6 – Сравнение томографических изображений образца А, полученных на монохроматическом (а-г) и полихроматическом (д-з) нейтронном пучке. Дополнительные томографические срезы: б, д – чистая аустенитная сталь; в, е – 25% алюминиевой бронзы и 75% аустенитной стали; г, ж – 50% алюминиевой бронзы и 50% аустенитной стали

Метод чередующихся слоёв продемонстрировал бездефектную печать. В образцах, изготовленных путём резкого перехода, отмечено формирование вертикальных трещин, сонаправленных с направлением печати изделия. Данное явление требует проведения дополнительных исследований [А3].

При производстве методом АТ формирование внутренних дефектов, таких как поры и включения во многом определяет итоговые механические свойства готового изделия [6], а области с преимущественной ориентацией зерен (неоднородная текстура) приводит к их анизотропии. Поэтому целью данной работы было исследование внутренней структуры стальных пластин, изготовленных по технологии прямого лазерного выращивания из стали AISI 316L и AISI 410 методами нейтронной визуализации на монохроматическом пучке и дифракции с выделенного объема.

Приведены результаты исследований 4-х образцов (рисунок 7), полученных методом ПЛВ в Сколковском институте науки и технологий и в Институте лазерных и сварочных технологий.

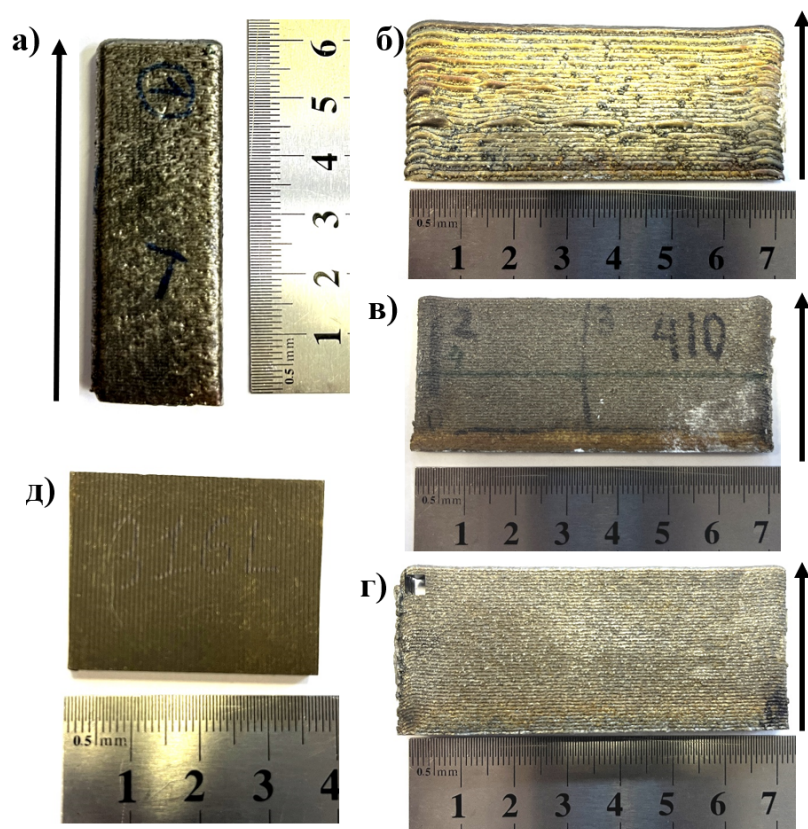


Рисунок 7 – Образцы аддитивных производств, изготовленные методом ПЛВ из сталей AISI 316L (а, б) и AISI 410 (в, г), образец традиционного производства из стали AISI 316L (д), стрелкой обозначено направление выращивания

По результатам исследований можно сделать вывод, что производство изделий методом ПЛВ из сталей AISI 316L и AISI 410 ведет к появлению сильно выраженной неоднородной текстуры из областей размерами от долей миллиметра до нескольких миллиметров с преимущественной ориентацией зерен, которая может сильно меняться при переходе от одной области к другой. В образцах из стали AISI 316L неоднородность текстуры выражена сильнее (рисунок 8). В образце из стали AISI 410 было обнаружено большое количество пор диаметром до 400 мкм, которые локализованы на границе между проходами печати.

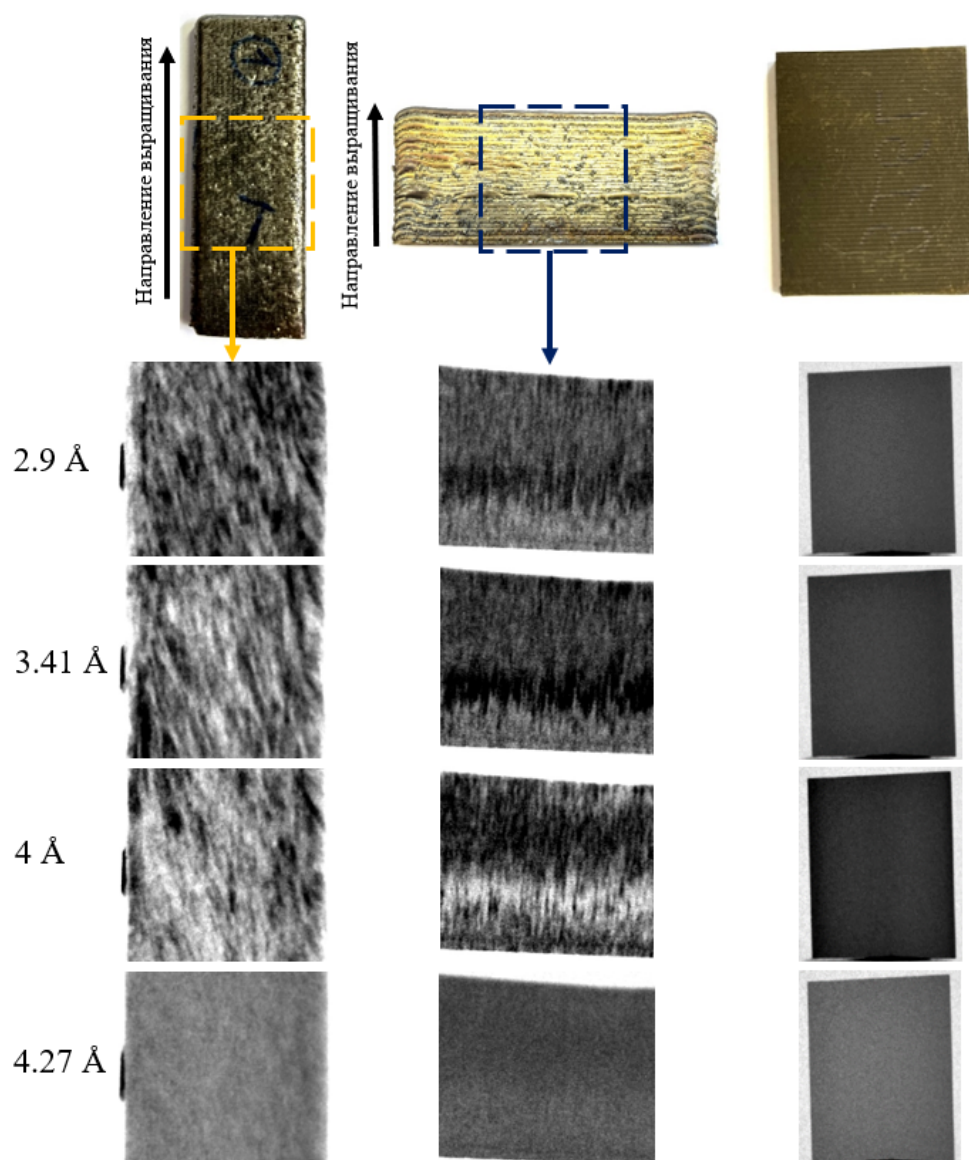


Рисунок 8 – Радиографические изображения образцов, изготовленных методом АТ (слева) и традиционным методом (справа), полученные при различных длинах волн нейтронов

Методы нейтронной дифракции и визуализации показали возможность качественного определения неоднородности текстуры в массивных металлических образцах без измерения полюсных фигур и построения функции распределения ориентаций. При этом полученные результаты с использованием представленных методов показывают хорошее согласие (рисунок 9) [А8].

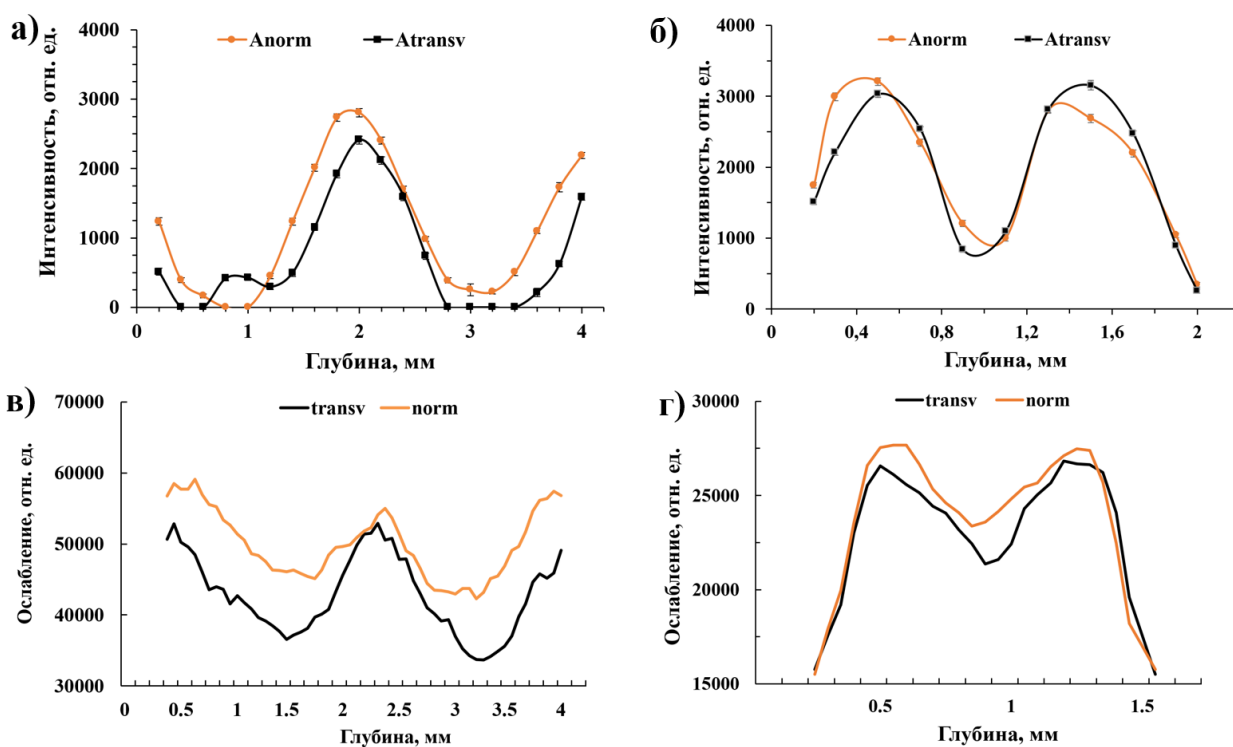


Рисунок 9 – Сравнение зависимости интегральной интенсивности дифракционного пика и ослабления нейтронного пучка от глубины для образцов из стали AISI 316L (а, в) и AISI 410 (б, г); A_{norm} – интегральная интенсивность для нормальной компоненты, A_{transv} – для поперечной; norm, transv – значение ослабления нейтронов, взятое по профилю с той же области, что и в эксперименте по дифракции

ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ. За последние годы методы нейтронной визуализации всё чаще применяются для решения актуальных задач в таких областях науки, как биология, медицина (изучение костной ткани при остеопорозе [A4]), геология и изучение объектов культурного наследия [A5-A7].

Изучение объектов культурного наследия методами нейтронной визуализации представляет собой передовой подход в области сохранения и анализа исторических артефактов. Так как методы являются неразрушающими, исследование внутренней структуры объектов проводится без механического воздействия, что особенно важно для сохранения первоначального облика артефактов, которые зачастую существуют в единственном экземпляре. Таким образом, методы нейтронной визуализации способствуют расширению знаний о

прошлом, открывая новые грани истории и искусства, сохраняя при этом культурное наследие.

В пятой главе представлены результаты работ по исследованию объектов культурного наследия России. Методы нейтронной визуализации благодаря высокой проникающей способности нейтронов и их чувствительности к легким элементам (в частности, к водороду), показали высокую эффективность в исследовании внутренней структуры древних артефактов.

Был изучен бронзовый рельефный крест-энколпион XVI–XVII вв. (рисунок 10, а), найденный в 2017 г. экспедицией Института Археологии РАН в Новодевичьем монастыре. Размеры креста составляют 102×52×11 мм. Внешняя поверхность покрыта толстым слоем окислов, запорные штифты присутствуют (рисунок 10, б, в).

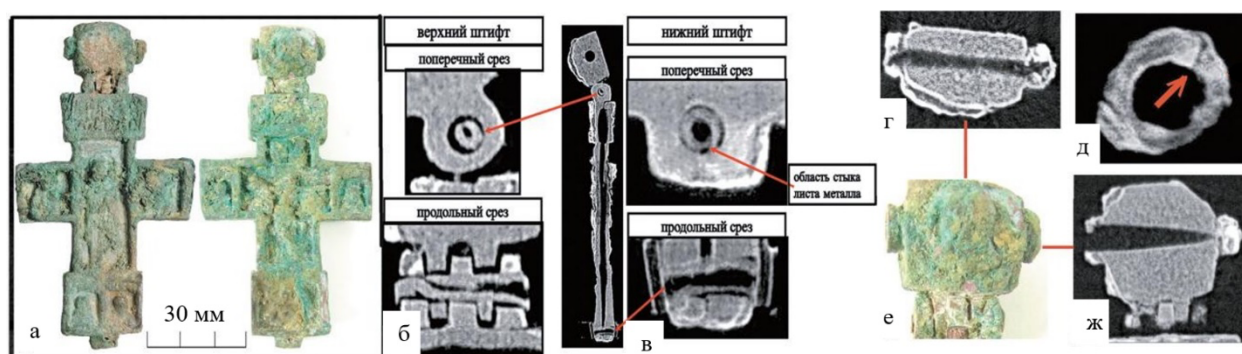


Рисунок 10 – Технологические особенности изготовления креста-энколпиона по данным нейтронной томографии. а – макрофотография энколпиона; б, в – схема устройства запорных штифтов (нейтронные томографические срезы); г – томографический срез оглавия (вид сверху); д – томографический срез полый втулки (уровень половины глубины); е – оглавие (деталь общей макрофотографии); ж – томографический срез оглавия (фронтальный)

Методы нейтронной визуализации и дифракции позволили изучить структуру деталей средневекового креста-энколпиона, технологию его изготовления, строение внутренних полостей и скрытых коррозией надписей, а также определить природу вложений.

Суммируя результаты, полученные до вскрытия энколпиона, можно говорить о присутствии частиц волокон органического происхождения, окислов

и грунта. При наличии органических вложений данную часть методов целесообразно использовать на этапе предварительного анализа (до раскрытия створок) [A5, A7].

В 2017 г. в ходе подводных археологических раскопок на участках дна Керченской бухты, выполненных специалистами Института археологии РАН перед строительством опор Крымского моста, был найден крупный фрагмент античной терракоты, изображающей бородатую мужскую голову [7]. Размеры терракоты составляют 24.68×13.70×26.48 см. Установить функциональное назначение объекта (фрагмент статуи, навершие колонны, украшение корабля и пр.) не удалось из-за отсутствия аналогий в каких-либо музейных собраниях. В этих обстоятельствах были предприняты попытки получить часть необходимой для идентификации информации с помощью комплексного исследования методами нейтронной и рентгеновской томографии.

Одной из задач нейтронных томографических исследований стало изучение формы и расположения фрагментов свинца, сохранившихся на внутренней поверхности изделия. На значительной площади свинец присутствует в виде мелких капель, а на внутренней поверхности изделия, напротив носа, сохранился в форме наплыва размером 6.09 × 1.46 см. Из-за большого размера свинцового наплыва он полностью поглощает рентгеновское излучение при эксперименте. Поэтому использовался метод томографии, использующий в качестве проникающего излучения нейтроны, которые слабо взаимодействуют со свинцом.

Результаты томографических исследований (рисунок 11) позволяют предположить, что изделие является скульптурой, изготовленной преимущественно методом скульптурной лепки, с ручной проработкой некоторых мелких деталей инструментом с режущей кромкой (стеком) и последующим заглаживанием швов и неровностей. Во всех местах крепления деталей отмечено расслаивание глины, что наиболее вероятно при их механическом соединении с основной головы. Об этом свидетельствуют

многочисленные технологические швы в местах соединения частей глины, соответствующие контуру различных рельефных деталей изделия. Отметим, что технологические швы, так же, как и трещины, представляют собой зоны повышенного риска для сохранности объекта культурного наследия.

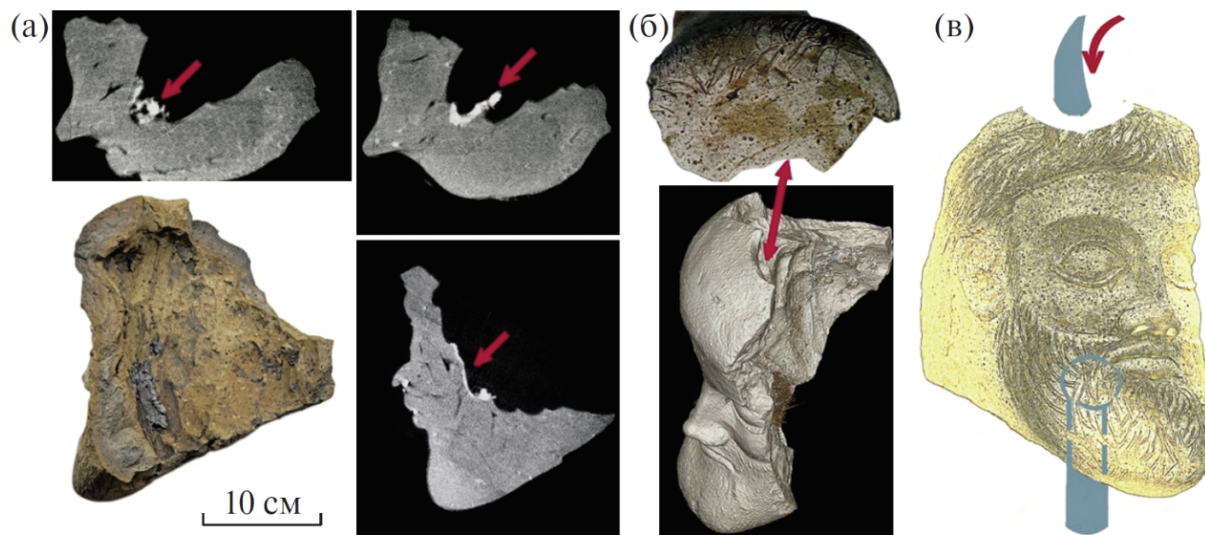


Рисунок 11 – Фото и томографические нейтронные срезы фрагментов свинца, стрелками обозначен свинцовый натек (а); на нейтронных томографических срезах свинец и смола выделяются светлым цветом; фото фрагмента теменного отверстия, стрелкой обозначено округлое отверстие на фото и на 3D-модели терракоты (б); реконструкция крепления терракоты: предполагаемая свинцовая стяжка (серый цвет) и процесс ее заливки через теменное отверстие (в)

Наличие на внутренней поверхности терракоты свинцового напыла позволяет предположить, что в скульптуре существовала свинцовая стяжка для крепления изделия к неизвестной основе, расположенной под головой. Напыль с максимальной толщиной 7 мм заполняет один из пальцевых следов, выдавленных скульптором при формовке изделия (рисунок 5.5, а). Анализ направления свинцового напыла и отдельных распределенных по внутренней поверхности металлических фрагментов показывает, что свинец заливался со стороны темени. Несмотря на указанные наблюдения, достоверно установить, являлось ли изделие частью скульптуры или отдельным элементом, пока не удалось. Поэтому высказанное предположение о том, что терракотовая голова могла быть одной из скульптурных деталей, гипотетично [А6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы на исследовательском реакторе ИР-8 (НИЦ «Курчатовский институт») была создана современная экспериментальная база для комплексной нейтронной визуализации. На станции ДРАКОН и экспериментальном стенде ПОНИ успешно проводятся исследования в области материаловедения, аддитивных технологий и изучения объектов культурного наследия. Основные результаты исследований, опубликованные в работах [А1–А7], обобщены следующим образом:

1. Осуществлен ввод в эксплуатацию, созданной на базе реактора ИР-8, станции нейтронной визуализации ДРАКОН, с возможностью использования монохроматического нейтронного излучения с изменяемой длиной волны;
2. Экспериментально подтверждена возможность использования методики дифракционно-контрастной визуализации на станции ДРАКОН;
3. Разработан и создан компактный прибор нейтронной визуализации на полихроматическом нейтронном пучке ПОНИ с улучшенным пространственным разрешением.
4. Методами нейтронной визуализации впервые изучена структура изделий из функционально-градиентных материалов, полученных методом прямого лазерного выращивания, выявлено формирование макро- и микроскопических дефектов в зоне градиентного перехода.
5. С использованием методов нейтронной дифракции и визуализации на монохроматическом пучке выявлена сильно выраженная неоднородная текстура в стальных пластинах, изготовленных из сталей AISI 316L и AISI 410, при их производстве методом прямого лазерного выращивания.
6. Методы нейтронной визуализации и дифракции позволили изучить структуру деталей средневекового креста-энколпиона, технологию его

изготовления, строение внутренних полостей и скрытых коррозией надписей, а также определить природу вложений, не нарушая целостности самого креста.

7. С использованием методов нейтронной визуализации была исследована внутренняя структура уникальной терракотовой скульптуры, найденной при строительстве Крымского моста на дне Керченского залива. По данным нейтронной томографии удалось провести анализ свинцового наплыва и отдельных распределенных по внутренней поверхности металлических фрагментов, указывающих на то, что свинец заливался со стороны темени.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

[A1] Соменков В. А., Глазков В. П., Эм В. Т., Гуреев А. И., **Мурашев М. М.**, Садыков Р. А., Аксенов С. Н., Трунов Д. Н., Столяров А. А., Алексеев А. А., Кравчук Л. В. Установка для комплексной радиационной диагностики «ДРАКОН» //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – №. 9. – С. 93–99.

[A2] **Мурашев М. М.**, Глазков В. П., Эм В. Т. Визуализация дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами стали методом нейтронной радиографии //Приборы и техника эксперимента. – 2021. – №. 3. – С. 147–151.

[A3] **Мурашев М. М.**, Эм В. Т., Глазков В. П., Шишковский И. В., Макаренко К. И., Сульянова Е. А. Исследования металлических изделий аддитивных производств методами нейтронной визуализации //Дефектоскопия. – 2024. – №1. – С. 28–39.

[A4] Choi Y., Paik D. J., Bogdanov S. G., Valiev E., Borisova P. A., **Murashev M. M.**, Em V. T., Pirogov A. N. Neutron scattering on humane compact bone // Physica B: Condensed Matter. – 2018. – Т. 551. – С. 218–221.

[A5] Грешников Э. А., Пожидаев В. М., Малахов С. Н., Подурец К. М., Коваленко Е. С., **Мурашев М. М.**, Глазков В. П., Говор Л. И., Преснякова Н. Н.,

Светогоров Р. Д., Дороватовский П. В., Трунькин И. Н. Исследования креста-энколпиона из Новодевичьего монастыря естественнонаучными методами //Российская археология. – 2020. – №. 4. – С. 165–183.

[А6] Ковальчук М. В., Яцишина Е.Б., Макаров Н.А., Грешников Э.А., Анциферова А.А., Гунчина О.Л., Кашкаров П.К., Коваленко Е.С., **Мурашев М.М.**, Ольховский С.В., Подурец К.М., Тимеркаев В.Б. Томографические исследования терракотовой головы из Керченской бухты //Кристаллография. – 2020. – Т. 65. – №. 5. – С. 832–838.

[А7] Макаров Н. А. Грешников Э. А., Зайцева И. Е., Подурец К. М. Коваленко Е. С., **Мурашев М. М.** Невидимые святыни. Вложения в средневековых крестах-энколпионах по данным комплексных аналитических исследований //Краткие сообщения Института археологии. – 2020. – №. 258. – С. 25–45.

[А8] **Мурашев М. М.**, Карпов И. Д., Эм В. Т., Иванов С. Ю., Земляков Е. В., Бабкин К. Д. Нейтронные исследования остаточных напряжений и текстуры в стальных пластинах, полученных методом прямого лазерного выращивания //Физика металлов и металловедение. – 2025. – Т. 126. – №. 10. – С. 1179–1189.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Aswal D.K., Sarkar C.S., Kashyap Y.S. (ed.). Neutron imaging: basics, techniques and applications. – Springer Nature. – 2022. – 360 с.

[2] Ehntin I.R. et al. Neutron diffractometer with a doubled monochromator // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – Т. 5. – С. 56–58.

[3] Makarenko K. et al. Specific aspects of the transitional layer forming in the aluminium bronze – stainless steel functionally graded structures after laser metal deposition // Procedia CIRC. 2020. – Т. 94. – С. 346–351.

[4] Makarenko K.I. et al. Mechanical characteristics of laser-deposited sandwich structures and quasi-homogeneous alloys of Fe-Cu system // *Materials & Design*. – 2022. – Т. 224. – С. 111313.

[5] Makarenko K.I., Shishkovsky I.V. Direct energy deposition of Cu-Fe system functionally graded structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing. 2020. – Т. 969. – №. 1. – С. 012104.

[6] Savchenko N.L. et al. Features of the structural-phase state of the alloy Ti-6Al-4V in the formation of products using wire-feed electron beam additive manufacturing // *Metal Working and Material Science*. – 2018. – Т. 20. – № 4. – С. 60–71.

[7] Ольховский С.В. Подводные раскопки на объекте археологического наследия «Бухта Ак-Бурун» // *Таврические студии*. – 2017. – №. 12. – С. 118–120.