



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки

**ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
им. А.А. Байкова
Российской академии наук
(ИМЕТ РАН)**

119334, г. Москва, Ленинский пр., 49
Тел. +7 (499) 135-20-60, факс: +7 (499) 135-86-80
E-mail: imet@imet.ac.ru <http://www.imet.ac.ru>
ОКПО 02698772, ОГРН 1027700298702
ИНН/КПП 7736045483/773601001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИМЕТ РАН

член-корреспондент РАН

В.С. Комлев

« 05 » марта 2024 г.

Отзыв ведущей организации на диссертационную работу Бузмакова Алексея Владимировича «Аппаратурные и вычислительные методы в рентгеновской микротомографии», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Бузмакова А.В. посвящена разработке новых методов рентгеновской микротомографии, а также соответствующих экспериментальных приборов и установок на базе лабораторных рентгеновских источников.

Прогресс в областях создания новых конструкционных материалов, полимерных технологий, микробиологии и медицины связан и напрямую зависит от успехов в развитии методов исследования внутренней структуры объектов с высоким разрешением. Рентгеновские диагностические методы являются неразрушающими, и поэтому их применение для названных целей является обоснованным. Получение лишь двумерных изображений внутренней структуры объектов сегодня часто недостаточно для исследователей и технологов. Поэтому необходимы методы для восстановления трёхмерного распределения характеристик объектов. Методы компьютерной микротомографии предоставляют исследователям такую возможность. При этом повышение разрешения может быть обеспечено применением как увеличивающих рентгенооптических элементов, так и новых вычислительных подходов. Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, актуальна и практически значима.

Бузмаковым А.В. получен ряд принципиально новых результатов, связанных с разработкой и применением лабораторных микротомографов. Предложенные автором методы проектирования и моделирования рентгенооптических систем

могут быть использованы при создании не только новых лабораторных микротомографов, но и экспериментальных станций на источниках синхротронного излучения.

Разработанные автором программы и методы по реконструкции и анализу фазоконтрастных изображений с помощью методов машинного обучения позволят не только повысить информативность томографических измерений, но и существенно уменьшить нагрузку на специалистов, анализирующих такие реконструкции.

Предложенный автором новый подход по разработке методов обработки томографических данных для нестандартных геометрических конфигураций или условий эксперимента, безусловно, будет использован для проведения оригинальных томографических измерений в тех случаях, когда классические подходы неприменимы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 302 страницы, включая 139 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 286 наименования.

Во введении на основе краткого обзора практических задач, связанных с интроскопией в рентгеновском диапазоне длин волн, даётся обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе, представляющей собой литературный обзор, рассмотрены основные схемы рентгеновской микротомографии, дано описание различных рентгенооптических элементов, а также проведён анализ современных математических методов решения задач компьютерной томографии.

Во второй главе описана методика проектирования, моделирования, создания и применения лабораторного микротомографа на монохроматическом излучении. Автором проведено исследование влияния рентгенооптических параметров микротомографа на разрешение и контрастность получаемых изображений. Описаны методы подавления артефактов, возникающих в результате нарушения калибровки или юстировки микротомографа. Показано, что использование монохроматического рентгеновского излучения позволяет получать более информативные томографические результаты по сравнению с полихроматическим излучением. Численно и экспериментально показано, что проведение исследований с использованием нескольких энергий излучения может позволить идентифицировать элементный состав изучаемых объектов. Проведено комплексное исследование ряда биологических объектов на монохроматическом рентгеновском излучении на энергиях 5,4, 8,0 и 12,0 кэВ. Показано, что исследования на монохроматическом излучении хорошо согласуются с данными растровой электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа.

Третья глава посвящена разработке методов и подходов в рентгеновских фазоконтрастных исследованиях. В этой главе показана возможность проведения фазоконтрастных измерений на разработанном микротомографе "Томас". Описано разработанное программное обеспечение WavePropaGator для моделирования фазоконтрастных изображений, получаемых на синхротронном излучении. Разработаны методы сегментации рентгеновских фазоконтрастных

микротомографических изображений методами машинного обучения, применённые для исследования элементов лимбической системы человека.

В четвёртой главе приведено описание созданных автором итерационных подходов к томографической реконструкции в нестандартных геометрических конфигурациях или сложных условиях эксперимента. К таковым относятся томографическая реконструкция в случае, когда часть проекций повреждена, или объект не входит в поле зрения детектора целиком; реконструкция объектов, изменяющихся во времени; реконструкция структуры дефектов в кристаллических объектах, когда съёмка происходит в геометрии топо-томография; реконструкция дефектов на вогнутой поверхности в скользящей геометрии («шепчущая галерея»). Стоит отметить, что все приведённые в данной главе алгоритмы иллюстрируются применением не только на модельных данных, но и на реальных объектах, изучение которых традиционными методами было невозможно.

По работе можно сделать следующие замечания:

- 1) Томографические исследования реальных объектов сделаны автором только на биологических образцах. Поэтому из текста диссертации непонятно, можно ли перенести предлагаемые подходы на исследования металлических деталей и других сильно поглощающих объектов. Какие есть ограничения у предлагаемых подходов?
- 2) Разработанный автором лабораторный микротомограф позволяет проводить измерения как на монохроматическом, так и на полихроматическом излучении. Известно, что при томографических измерениях на полихроматическом излучении возникают артефакты типа «чаша» (beam hardening). В тексте диссертации не указано, как автор компенсировал такие артефакты?
- 3) При описании разработанных методов 4D-томографии непонятно, с какой скоростью должен изменяться объект, чтобы было возможно зафиксировать изменение его структуры.

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку работы и не умаляют её научную ценность.

В целом, диссертация Бузмакова А. В. является самостоятельным завершённым оригинальным научным исследованием, достоверность результатов и обоснованность выводов которого не вызывают сомнений. Достоверность полученных результатов основана на надёжности и обоснованности применяемых методов, а также экспериментально подтверждена большим массивом полученных автором результатов. Полученные в диссертации результаты являются новыми, что подтверждено публикациями в виде 65 статей в ведущих российских и международных рецензируемых журналах из списка Web of Science, в том числе Письма в ЖЭТФ, УФН, Scientific Reports, Physical Review Letters, Sensors, Medical Physics. Результаты работы докладывались на многих престижных российских и международных семинарах и конференциях.

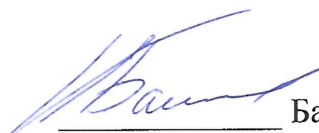
Полученные в диссертации результаты соответствуют специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

По актуальности тематики, обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов диссертационная работа Бузмакова А. В. «Аппаратурные и вычислительные методы в рентгеновской микротомографии» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 26.10.2023 г.), а её автор, Бузмаков Алексей Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Доклад А.В. Бузмакова по материалам диссертации был заслушан и обсуждён на заседании Секции «Металловедение и металлофизика» Учёного совета ИМЕТ РАН, протокол № 1/24 от 25 января 2024 года. На заседании присутствовало 17 членов Секции из 25. Результаты голосования: «за» – 17, против – нет, воздержавшихся – нет.

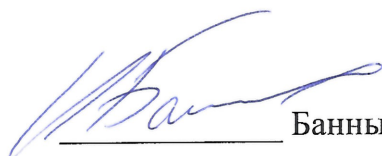
Отзыв ведущей организации подготовил: Банных Игорь Олегович, доктор технических наук, заведующий Лабораторией конструкционных сталей и сплавов им. акад. Н.Т. Гудцова (№7) ИМЕТ РАН.

д.т.н. (специальность 05.16.01)
Зав. Лабораторией конструкционных сталей и
сплавов им. академика Н.Т. Гудцова ИМЕТ РАН
Тел.: +7(499)135-96-93
Эл.почта: ibannykh@imet.ac.ru

 Банных И.О.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук (ИМЕТ РАН)
119334, Москва, Ленинский пр-кт, 49
Тел. (499) 135-20-60, 135-86-11; факс: 135-86-80
E-mail: imet@imet.ac.ru; <http://www.imet.ac.ru>

Согласен на передачу персональных данных

 Банных И.О.