

ОТЗЫВ

официального оппонента Клопотова Анатолия Анатольевича на диссертацию Смолянского Владимира Александровича «Разработка, исследование и применение микрофокусного источника тормозного излучения на основе малогабаритного бетатрона в рентгенографии и томографии высокого разрешения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Актуальность темы диссертационной работы

Промышленная рентгеновская томография все чаще становится основным методом контроля качества, отработки технологических решений, обратного проектирования, контроля сборочных операций при производстве сложных изделий ответственного назначения. В тоже время современные технологии производства обеспечивают постоянный рост размерности и сложности таких изделий. Несомненно, в будущем эти технологии займут основное место в высокотехнологичном производстве, что стимулирует развитие методов и средств контроля качества крупногабаритных изделий сложной формы.

Несмотря на значительный прогресс в области рентгеновской промышленной томографии, высокоэнергетическая томография не показывает такого развития уже более 30 лет. Главным сдерживающим фактором является отсутствие специализированных источников излучения. Для контроля крупногабаритных, высокоплотных изделий проникающего излучения, генерируемого рентгеновской трубкой, недостаточно, поэтому требуется применение более высокоэнергетических ускорителей заряженных частиц в диапазоне энергий 1-10 МэВ с микро-фокусом. Таким образом, разработка микрофокусного источника высокоэнергетического излучения для применения в рентгенографии и томографии является, несомненно, актуальной задачей.

Общая методология работы

При выполнении диссертационной работы В.А. Смолянским предлагается исследовать и разработать новые, более эффективные методы генерации излучения в циклическом ускорителе электронов - бетатроне. При этом особое внимание будет уделено изготовлению микромишеней для генерации жесткого электромагнитного излучения путем бомбардировки тормозной мишени пучком ускоренных электронов и их дальнейшему исследованию. При производстве микромишеней использованы наиболее перспективные технологии и методы, например, метод магнетронного распыления для возможного изготовления мишеней микронных размеров с необходимыми структурными и эксплуатационными характеристиками. Для реализации

эффекта многократной циркуляции электронного пучка при изменении управляющего магнитного поля ускорителя реализован «медленный сброс» ускоренных электронов, за счет чего повысилась яркость микрофокусного излучения. Данные методы частично были представлены в теории, однако, ни один из них так и не был реализован на практике.

Методики исследования

Методики исследования соответствуют современному уровню. Особо следует отметить, что в рецензируемой работе для решения поставленных задач профессионально использованы современные методы исследований, основанные на физических принципах взаимодействия высокоэнергетического рентгеновского излучения с веществом и его регистрацией. Анализ результатов измерений проведен с помощью численных и статических методов обработки экспериментальных данных и специализированного программного обеспечения.

Анализ содержания диссертации

Цель диссертационной работы состояла в разработке, исследовании и применении микрофокусного источника тормозного излучения с энергией фотонов более 1 МэВ с использованием оригинальных компактных бетатронов для рентгенографии и томографии высокого разрешения. Для решения этой цели В.А. Смолянский грамотно сформулировал и решил задачи при диссертационном исследовании.

Диссертация изложена на 128 страницах и включает в себя введение, 4 главы основного текста, содержащего 9 таблиц, 66 рисунков, заключение, список используемой литературы, включающий 128 наименований, а также 3 приложения с актами внедрения результатов работы.

Во введении описаны актуальность, поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований, представлены методология исследований, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. Здесь рассмотрено современное состояние и практическое значение существующих высокоэнергетических источников тормозного излучения с малым фокусным пятном для применения в рентгенографии и компьютерной томографии. Приведено описание источников излучения и определены наиболее важные технические характеристики необходимые для рентгеновского неразрушающего контроля. По результатам сравнения описанных лабораторных источников и ускорителей практического применения выявлено, что наиболее привлекательными

характеристиками, такими как размер фокусного пятна, масса и габариты, простота в обслуживании и надежность, цена, обладает бетатрон.

Вторая глава посвящена разработке макета микрофокусного источника на основе производимых в Томском политехническом университете, бетатронов с энергиями 4 и 18 МэВ с внутрикамерными гониометрами с ультратонкими держателями для позиционирования микромишеней по положению и углам ориентации относительно взаимодействующих с ними пучков электронов. Изложена суть метода уменьшения фокусного пятна, которая заключается в выборе сечения мишени с размерами, меньшими размеров сечения пучка ускоренных электронов. Приведено сравнение зависимости углового распределения излучения, мощности дозы, размеров фокусного пятна при использовании микромишени и обычной классической мишени. Показано, что несмотря на уменьшение мощности экспозиционной дозы микрофокусного источника по сравнению с классическим бетатроном, яркость разработанного микрофокусного источника увеличена на порядок за счет уменьшения размеров фокусного пятна.

В третьей главе представлены результаты рентгеновского контроля тест-объектов с микродефектами в виде щелей и включений из более плотного материала, выполненные с использованием тормозного излучения, генерируемым микрофокусным бетатроном и его прототипом. Косвенным методом произведена оценка размеров источника излучения по эталону нерезкости Duplex IQI и приведен сравнительный анализ качества рентгеновских изображений. Особое внимание уделено экспериментальному обоснованию возможности формирования увеличенных рентгеновских изображений с высоким разрешением на основе применения метода фазового контраста в области тормозного излучения с энергией фотонов более 1 МэВ. Исследования повышенного краевого контраста были проведены с использованием пластин разной толщины с полированными краями. Сравнение показало, что краевой контраст и разрешающая способность при использовании излучения микрофокусного источника гораздо выше.

В четвертой главе приведено описание экспериментального стенда на основе разработанного макета микрофокусного источника. Приводятся технические характеристики рентгеновской цифровой системы. Представлены результаты неразрушающего рентгеновского контроля крупногабаритного объекта вагоностроительной промышленности. Определены наилучшие параметры для сканирования с высокой чувствительностью и скоростью контроля. Установлено, что разработанный в диссертационной работе источник на основе малогабаритного бетатрона с наибольшей проникающей способностью и малым размером фокусного пятна, позволяет верифицировать скрытые дефекты микронных размеров.

В заключении формулируются основные результаты и выводы, полученные в ходе проведенных исследований.

В Приложениях содержится акты об использовании результатов диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Сформулированные научные положения, выносимые на защиту, основаны на тщательном анализе результатов экспериментальных и теоретических исследований, поэтому являются вполне обоснованными. Экспериментальные исследования были получены с использованием современного оборудования. Результаты исследований проанализированы и получены закономерности, соответствуют целям и задачам диссертационной работы. Выводы являются результатом анализа и обобщения проведенных экспериментальных данных.

Новизна наиболее значимых результатов

Научная новизна выполненных исследований заключается в преодолении ограничения микрофокусных источников на основе рентгеновских трубок по жесткости излучения, необходимых для контроля крупногабаритных объектов, в том числе крупных композитных изделий.

Отмечу некоторые, наиболее значимые, на мой взгляд, результаты.

Предложено оригинальное техническое решение по уменьшению размеров фокусного пятна ускорителя, в котором за счет бетатронных колебаний, электронный пучок, циркулирующий внутри камеры бетатрона, постепенно выпадает на малоразмерную мишень, генерируя микрофокусное излучение.

Важным результатом является, то, что яркость источника, по сравнению с прототипом, повысилась не за счет увеличения ускоряемого тока, а за счет уменьшения размеров фокусного пятна.

Несомненный интерес представляют результаты по исследованию эффекта фазового контраста, который реализуется благодаря преломлению микрофокусного жесткого гамма-излучения на поверхностях боковых граней образцов. Данный эффект наблюдается впервые при высоких энергиях тормозного излучения.

В конечном итоге, на основе разработанного микрофокусного источника, реализован макет рентгенографической системы, позволивший локализовать микродефекты и определять внутреннюю геометрию сложных деталей с высокой точностью.

Практическая значимость результатов работы.

Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности разработки источников гамма излучения для

высококачественного контроля деталей сложных массивных конструкций, в том числе и из композитных материалов. Разработанные источники, а также рентгенографические и томографические системы на их основе найдут широкое применение в аэрокосмической и атомной промышленности.

Практическая значимость результатов диссертационных исследований подтверждена научно-технической работой в ходе проекта РНФ и актом о внедрении в учебный процесс, представленном в приложении диссертационной работы. Произведена экспериментальная апробация разработанной системы контроля.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе есть отступления от принятой терминологии, относительно характеристик промышленных источников излучения. Например, «светимость» вместо «яркость», «фокус излучения» вместо «фокусное пятно», «тормозное гамма-излучение», «до микронного уровня», «твердое тормозное излучение» и т.п. Также встречаются некорректные формулировки, например «источник... для... измерения крупных и плотных объектов...» (стр. 15), «уменьшение фокусного пятна за счет применения коллимирующих устройств ...» (стр.29)

2. По тексту диссертации встречаются опечатки, особенно в падежных окончаниях: «Усовершенствование схемы сканирование», «сокращению расстояние», «из-зи приближения», а также, неправильное использование или неиспользование запятых. Не раскрыта аббревиатура ОСШ до ее первого появления в тексте диссертации.

3. В работе не представлены ни теоретические, ни экспериментальные оценки спектральных характеристик излучения, генерированного при взаимодействии 18 МэВ-ного пучка с мишенями из различного материала, тем более, что в предложенных технических решениях основное взаимодействие электронов с мишенью – скользящее, которое должно приводить к генерации вторичных электронов и повышению общего фона мягкого рентгеновского излучения.

Заключение

Диссертация Смолянского В.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной научной задачи по разработке высокоэнергетического микрофокусного источника тормозного излучения для использования в томографических комплексах крупногабаритных изделий. Это имеет большое значение для развития соответствующей отрасли знаний.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации. Характеризуя работу в целом, следует отметить большой объем экспериментальных результатов, относящихся как к разработке макета

микрофокусного высокоэнергетического источника, так и к исследованию особенностей формирования рентгеновских фазоконтрастных изображений в области тормозного излучения с энергией фотонов более 1 МэВ. Вполне современный и высокий уровень проведенных исследований не вызывает сомнений. Результаты довольно полно представлены на конференциях и опубликованы в рейтинговых журналах. Автореферат полностью отражает содержание работы.

Считаю, что диссертация Смолянского Владимира Александровича «Разработка, исследование и применение микрофокусного источника тормозного излучения на основе малогабаритного бетатрона в рентгенографии и томографии высокого разрешения» отвечает требованиям п.п. 8-10 в соответствии с Порядком присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (Приказ № 66/од от 28.08.2019г.) предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Профессор кафедры прикладной механики
и материаловедения Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения «Томский
государственный архитектурно-
строительный университет»,
доктор физико-математических наук по
специальности 01.04.07 – физика
конденсированного состояния, профессор

Клопотов
Анатолий
Анатольевич

Юридический адрес:

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», 634003. Россия. г. Томск, пл. Соляная, д. 2

Телефон: +7-91

Эл. адрес: klopotovaa@tsuab.ru

Подпись Клопотова А.А. заверяю.
Ученый секретарь ТГАСУ

Какушкин Ю.А.

