

их под скользящими углами к пучку электронов. В нашем случае спектр излучения бетатрона, генерируемого в узких внутренних мишенях, простирается от нескольких кэВ до 18 МэВ. При мишенях из легких материалов в спектре излучения преобладает достаточно мягкое излучение, которое применимо для получения изображений достаточно тонких объектов. При взаимодействии с тяжелыми мишенями в спектре излучения преобладает жесткое излучение, что обусловлено сильным поглощением излучения мягкой части спектра в толще мишени. Излучение, генерируемое в таких мишенях, применимо для получения изображений толстых объектов из тяжелых материалов.

В работе исследована ориентационная зависимость угловых распределений излучения из узких мишеней. Полученные результаты показывают сильные изменения углового распределения генерируемого излучения при изменении ориентации узкой мишени относительно направления электронного пучка. Этот эффект не наблюдается при нормальном падении электронов на поверхность тонкой мишени.

Исследовалось формирование контраста изображений с использованием излучений из узких мишеней. Изображения эталонной микроструктуры *Duplex IQI* [2] были получены при ориентировании Si мишеней вдоль пучка электронов, для того чтобы электроны сбрасывались на узкую переднюю грань мишени, обеспечивая линейный микрофокус источника тормозного излучения. Изображения *Duplex IQI* были сформированы 10-50 кэВ фотонами мягкой части спектра излучения, генерированного в 8 и 50 мкм Si мишенях. Из-за малости источника излучения, полученные с трехкратным увеличением изображения эталонной микроструктуры *Duplex IQI* демонстрируют высокое разрешение деталей микроструктуры с участием как абсорбционного, так и фазового контрастов. Исследование формирования изображений достаточно толстых объектов из тяжелых материалов было проведено с использованием тормозного излучения, генерированного в 13 мкм Ta мишени. Полученное с увеличением 2,4 изображение стальной пластины толщиной 10 мм, помещенной за второй более широкой стальной пластиной толщиной 40 мм показало усиленный контраст края первой пластины, за счет реализации фазового контраста при столь малом фокусе источника излучения.

В работе исследована зависимость контраста изображения от положения микроструктуры в конусе излучения, которая определяется изменением эффективного размера источника излучения при изменении угла эмиссии излучения из мишени. Показано, что контраст изображения деталей *Duplex IQI* уменьшается при перемещении структуры на периферию конуса излучения, генерируемого в 50 мкм Si пластине, ориентированной вдоль пучка электронов. Это определяется увеличением эффективного размера источника $S_H = t+T \cdot |\theta_H|$, где t – толщина мишени, T – длина мишени вдоль пучка электронов, а θ_H – угол между поверхностью мишени и направлением эмиссии излучения на определенную деталь исследуемого объекта.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 17-19-01217.

Список литературы:

- [1] Pushin V S, Chakhlov V L 1997 Patent RU 2072643; <http://www.findpatent.ru/patent/207/2072643.html>
- [2] Website of the Computerised Information Technology Ltd: http://www.cituk-online.com/acatalog/Section_NDT_Digital_Radiography_Calibration_Devices.html

РЕНТГЕНОВСКИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА НА ОСНОВЕ КОНТУРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Оздиев Али Хосенович, Владимир Александрович Смолянский, Юрий Юрьевич Крючков
Томский Политехнический Университет
Юрий Юрьевич Крючков
ozdiev@tpu.ru

Одним из распространенных на настоящий момент методов контроля сварных соединений труб является рентгеновская томография. Стандартная схема контроля представлена на рисунке 1, при этом система настраивается таким образом, что излучение проходит сквозь две стенки трубы [1].

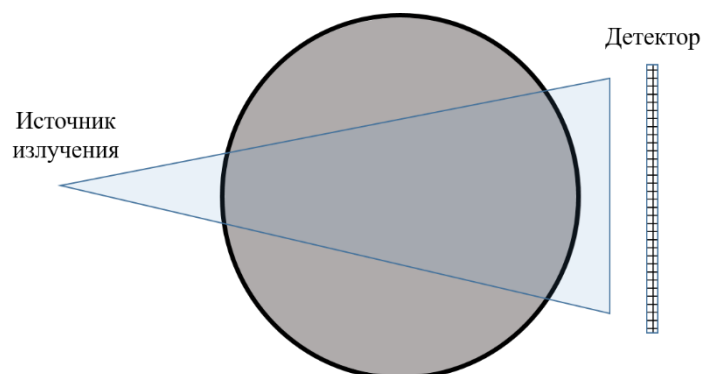


Рис.1. Схема томографического контроля труб (вид сверху)

Подобный подход обладает рядом ограничений, с которыми сталкиваются при попытке контроля труб большого диаметра. Так если диаметр контролируемой трубы достаточно большой, то для достижения необходимого качества реконструкции понадобится использовать рентгеновский источник высокой энергии, что может значительно увеличить себестоимость установки. Очевидно, что это связано с увеличением расстояния между источником и детектором, в результате которого плотность потока рентгеновского излучения, попадающего на поверхность детектора, уменьшается по причине ослабления потока в воздухе. При этом применение веерного пучка означает, что изображение на детекторе при большом расстоянии от источника будет увеличено пропорционально этому расстоянию, что вызовет дополнительные трудности при подборе оптимального детектирующего устройства.

В данной работе предлагается оптимизация томографического контроля сварных соединений труб большого диаметра путем применения контурной томографии. Под контурной томографией цилиндрических объектов подразумевается схема сканирования объекта исследования, при которой поток рентгеновских частиц направляется таким образом, что оптическая ось детектора практически совпадает с касательной к контуру цилиндра, проведенной перпендикулярно к детектору (рисунок 2).

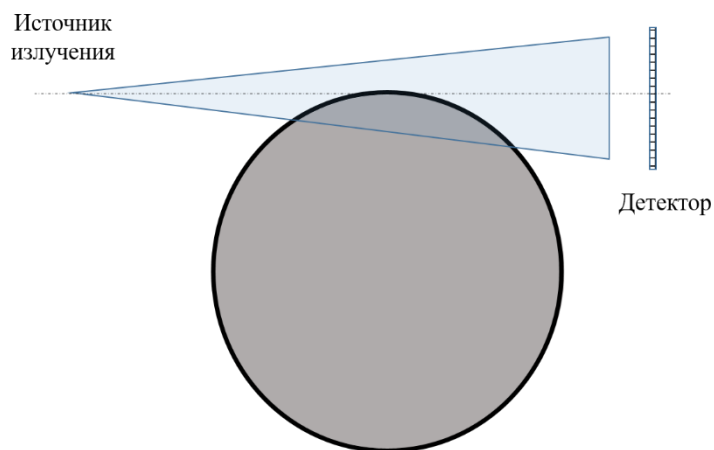


Рис.2. Контурная схема томографического контроля труб (вид сверху)

Для реализации реконструкции был выбран алгоритм обратного проецирования. Стандартный алгоритм обратного проецирования предназначен для реконструкции данных, полученных при сканировании стандартной схемой томографического контроля. Для того чтобы обеспечить работоспособность алгоритма при контурной схеме томографического контроля необходимо было оптимизировать алгоритм таким образом, чтобы обратные проекции в точности соответствовали траекториям пучка рентгеновских частиц в области реконструкции [2] (рисунок 3).

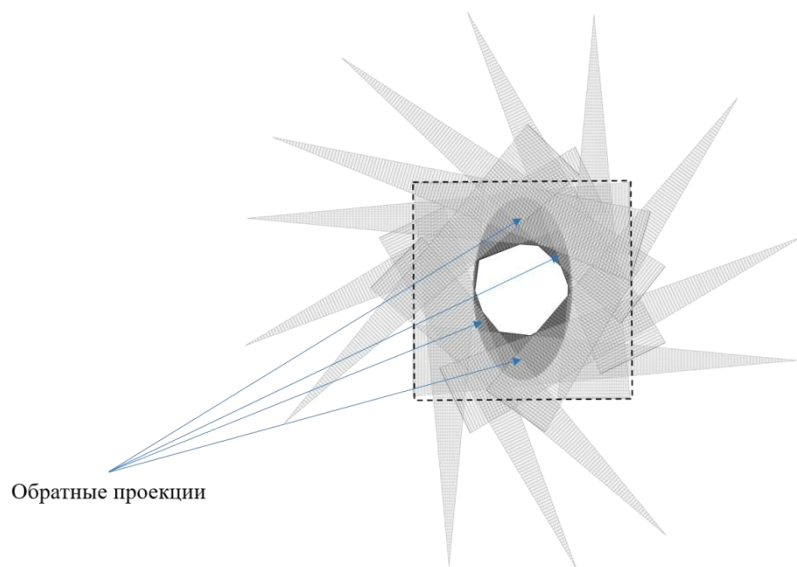


Рис.3. Обратное проецирование вдоль точных траекторий пучка рентгеновских частиц

Для проверки работоспособности предлагаемого подхода были проведены экспериментальные измерения, цель которых заключалась в поиске дефектов в сварном соединении, представленном на рисунке 4.



Рис.4. Образец сварного соединения

Для того чтобы произвести контурное сканирование рентгеновская установка была сконфигурировано таким образом, что детектирующее устройство, в качестве которого выступал плоскопанельный матричный детектор, было смещено относительно оси вращения объекта исследования, благодаря чему регистрируемые проекции представляли собой четверть объема трубы. Проекция после предварительной обработки имела вид, представленный на рисунке 5.

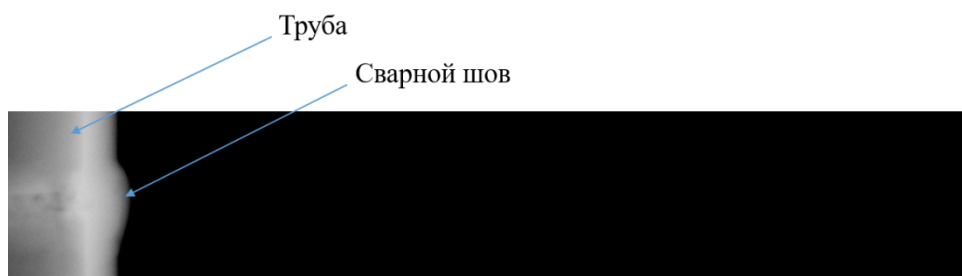


Рис.5. Пример исходной проекции, полученной в результате контурного сканирования

Итак, в результате обработки данных была получена трехмерная визуализация исследуемого сварного соединения с возможностью пошагово анализа его сечений. Визуальный анализ реконструированных сечений показал, что метод позволяет обнаруживать дефекты, но всё ещё нуждается в доработке. Так при сравнении с результатами томографического исследования, проведенного по стандартной схеме эксперимента, в местах, где располагаются дефекты, можно обнаружить существенный разброс в интенсивности пикселей (рисунок 6).

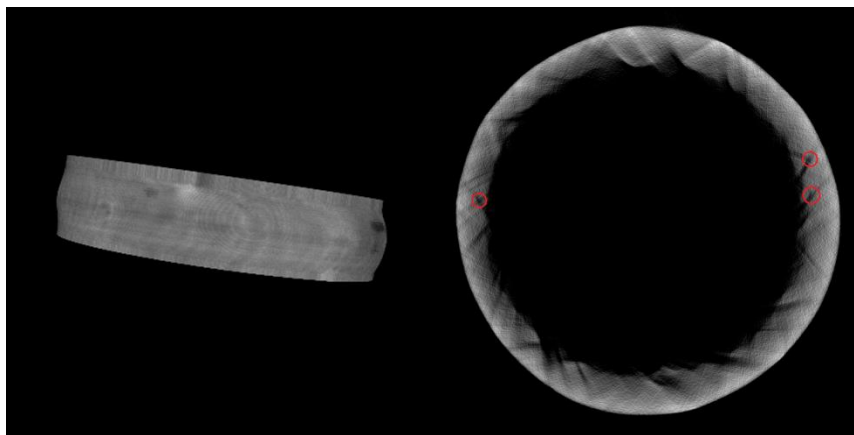


Рис.6. Результаты реконструкции: слева – трехмерная визуализация сварного шва, справа – одно из сечений

В результате проделанной работы была разработана контурная геометрия томографического сканирования с применением оптимизированного алгоритма обратного проецирования. Результаты реконструкции позволяют говорить о работоспособности подхода и указывают на то, что подход требует доработки. В дальнейшей работе будет предпринята попытка улучшить качество реконструкции путем увеличения количества исходной информации, а именно добавления дополнительного контура сканирования так, как показано на рисунке 7.

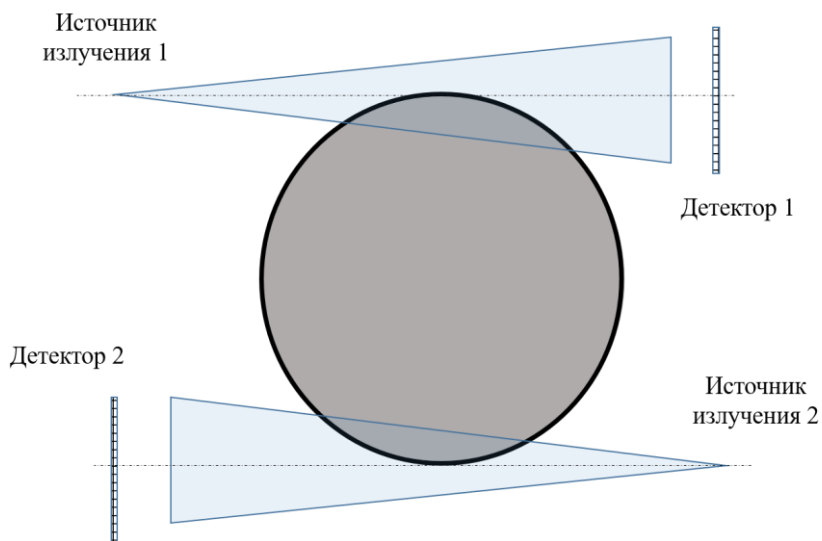


Рис.7. Предлагаемая схема томографического сканирования

Список литературы:

[1] Redmer B., Ewer U.t // X-Ray Testing of Circumferential Welds by a Mechanized radiometric Weld Inspection System, 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, New Orleans May 2000.
 [2] Оздиев А.Х., Модифицированный алгоритм обратного проецирования для томографической реконструкции при сканировании образца с пошаговым сдвигом // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2016) – Томск, 2016 – С. 433–434.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОПАР

Абуеллаиль Ахмед Али, Солдатов Андрей Алексеевич
 Томский политехнический университет
 Солдатов Алексей Иванович, д.т.н.
 demo_092@icloud.com