

ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННЫЙ ТОМОГРАФ НА ОСНОВЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЁГКИХ МАТЕРИАЛОВ

И.А. Кишин^{1),2),3*}, А. С. Кубанкин^{1),2),3}, Р.М. Нажмудинов^{1),2}, Д.Г. Фирсов³, Ю.С. Кубанкин³, Е.В. Болотов², С.М. Пиядин⁴

¹⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²⁾ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

³⁾ ООО «Вакуумные системы и технологии», Белгород, Россия

⁴⁾ Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Контроль прочностных и массогабаритных характеристик конструктивных элементов является стандартной задачей при разработке элементов различных установок. Одним из распространённых методов для решения таких задач является рентгеновская дефектоскопия. При данном подходе исследуемые объекты должны в достаточной степени поглощать рентгеновское излучение, что делает данный метод неэффективным для исследования объектов, слабо поглощающих рентгеновское излучение.

В настоящей работе разработана установка для исследования конструктивных элементов, изготовленных из лёгких материалов. Установка работает в мягком рентгеновском диапазоне до 10 кэВ в режиме энергодисперсионного анализа сигнала рентгеновского излучения, прошедшего через исследуемый объект и рассеянного объектом. Тесты, выполненные на трубе, изготовленной из углепластика, показали возможности построения карт распределения толщин стенки трубы с точностью лучше 10 мкм и примесных элементов с $Z > 20$. Измерения проводились при атмосферном давлении.

Обоснование

При прохождении рентгеновского излучения через слой вещества его начальная интенсивность уменьшается. Это изменение объясняется следующими явлениями: томсоновским рассеянием (когерентное рассеяние), комптоновским рассеянием (некогерентное рассеяние) и поглощением рентгеновского излучения в веществе. Для определения прошедшего через слой вещества монохроматического излучения известно выражение:

$$I = I_0 * e^{-\mu * x} \quad (1)$$

I_0 — интенсивность первичного рентгеновского излучения, x — толщина поглощающего слоя вещества, μ — линейный коэффициент ослабления, можно представить как обратную величину длины фотопоглощения:

$$\mu = \frac{1}{\lambda_0} \quad (2)$$

Исходя из выражения (1), зная начальный поток рентгеновского излучения (прямой луч) и интенсивность излучения после прохождения через слой вещества, можно вычислить толщину ослабляющего слоя излучения x используя формулу:

$$x = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) * \lambda_0 \quad (3)$$

Выражение (3) может быть использовано в качестве основы для измерения толщины объектов. Очевидно, что облучаемый объект не должен быть прозрачным для рентгеновского излучения и не должен полностью его поглощать. Первое из условий наиболее существенно для применения данного подхода к измерению толщины стенки труб из углепластика, преимущественно состоящих из углерода, а данный материал слабо поглощает рентгеновское излучение

Экспериментальная установка

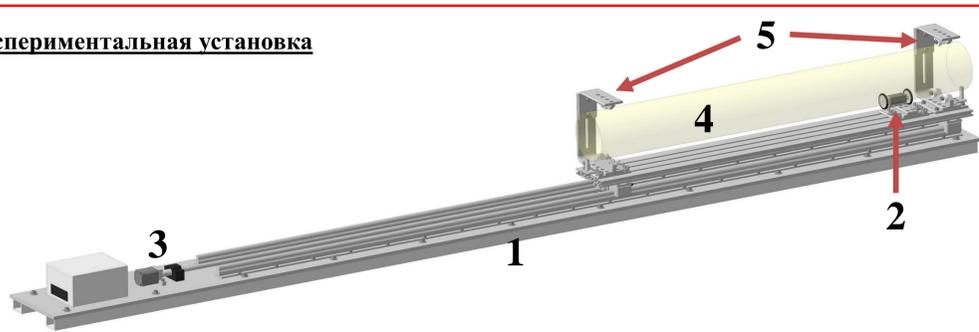


Рисунок 1 – Чертеж Энергодисперсионного томографа: 1. основание; 2.привод вращения трубы; 3. привод линейного перемещения трубы; 4. углепластиковая труба; 5. крепление трубы(возможность закреплять трубу с диаметром от 45 мм до 200 мм).

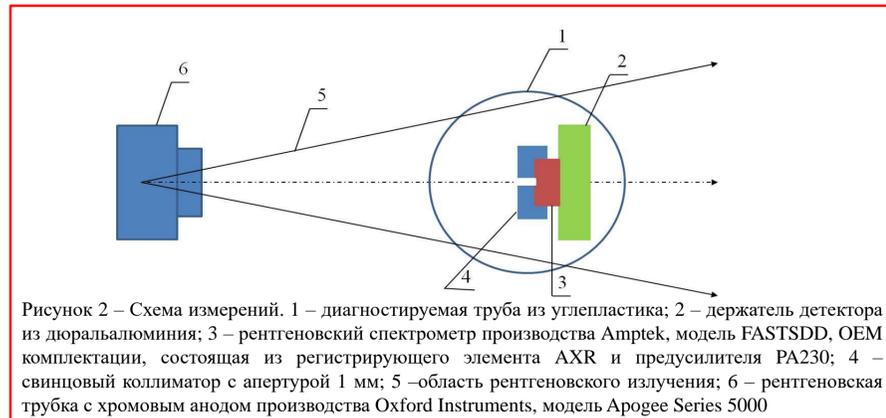


Рисунок 2 – Схема измерений. 1 – диагностируемая труба из углепластика; 2 – держатель детектора из дюралюминия; 3 – рентгеновский спектрометр производства Amptek, модель FASTSDD, OEM комплектации, состоящая из регистрирующего элемента AXR и предусилителя PA230; 4 – свинцовый коллиматор с апертурой 1 мм; 5 – область рентгеновского излучения; 6 – рентгеновская трубка с хромовым анодом производства Oxford Instruments, модель Apocee Series 5000

Эксперимент

В первой серии измерений, детектор находился на расстоянии 130 мм от края трубы. Измерения спектра излучения, прошедшего через трубу, выполнялись в режиме сканирования по окружности с шагом по внешней поверхности трубы 0.97 мм – труба вращалась при неизменном положении рентгеновской трубки и рентгеновского спектрометра. Поскольку длина окружности внешней поверхности трубы равна 152 мм, то для полного сканирования было необходимо провести 152 измерения. Для проверки корректности получаемых результатов количество измеряемых точек было увеличено на 10, что позволило сопоставить первые и последние 10 точек измерений, которые, очевидно, должны быть идентичными. Полученные данные суммарного числа фотонов K_{α} линии хрома для каждой точки сканирования представлены на рисунке 3, а на рисунке 4 представлен результат пересчёта в величину толщины стенки трубы. Из представленных результатов видна неоднородность зарегистрированного сигнала, при этом, максимум распределения наблюдается в области швов, что означает пониженную плотность вещества, т.е. – уменьшение толщины стенки трубы.

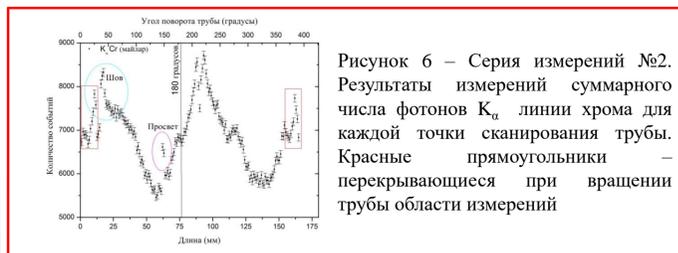


Рисунок 6 – Серия измерений №2. Результаты измерений суммарного числа фотонов K_{α} линии хрома для каждой точки сканирования трубы. Красные прямоугольники – перекрывающиеся при вращении трубы области измерений



Рисунок 3 – Результаты измерений суммарного числа фотонов K_{α} линии хрома для каждой точки сканирования трубы тика. Красные прямоугольники – перекрывающиеся при вращении трубы области измерений



Рисунок 4 – Результаты измерений толщины стенки трубы, выполненные на основе поглощения K_{α} линии хрома

Вторая серия измерений выполнена исходя из задачи рассмотрения достаточности предлагаемого подхода и настроек измерений для достижения требуемой чувствительности 100 мкм к измерению толщины стенки трубы. В измерениях использовались настройки эквивалентные первой серии измерений. Для решения данной задачи внешняя поверхность трубы была обернута одним слоем плёнки майлара толщиной 60 мкм, при этом, между смыкающимися краями был оставлен промежуток около 2 мм как показано на рисунке 5.



Рисунок 5 - Фотография участка трубы

Результаты измерений, выполненные в тех же условиях, в которых были проведены измерения серии №1 представлены на рисунке 6. Положение трубы, при котором рентгеновское излучение взаимодействовало с промежутком, оставленным в месте стыка краёв майларовой плёнки, показано красным овалом, видно, что в данном месте число зарегистрированных фотонов резко возрастает, при этом разница числа зарегистрированных в пике фотонов в сравнении с подложкой показывает чувствительность установки. В данном случае хорошо видно, что разница пика с подложкой составляет около 5 статистических ошибок, чего достаточно для убедительной интерпретации полученных данных.

На следующем этапе работы было просканировано 70 мм трубы начиная от края трубы. Шаг сканирования по окружности составлял 1 мм, шаг перемещения в линейной плоскости составлял 1 мм, таким образом было произведено 70 циклов измерений по 160 точек, каждая точка сканировалась в течение 1 секунды. Результаты сканирования представлены на рисунке 7 и 8.

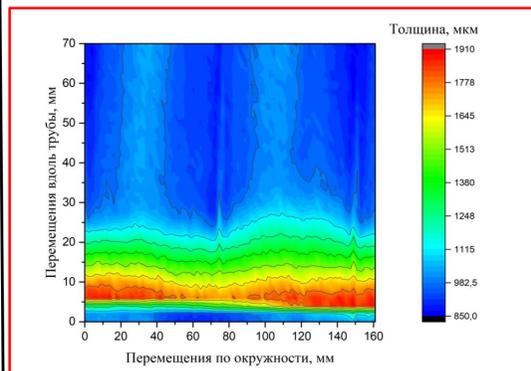


Рисунок 7 Карта распределения толщины трубы

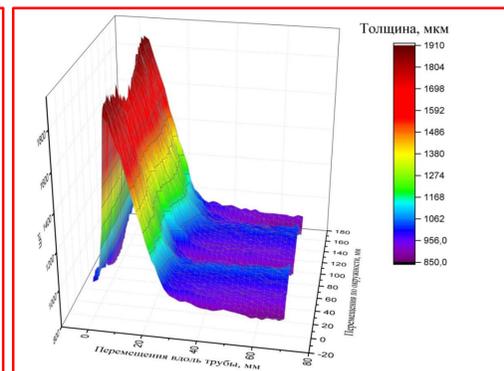


Рисунок 8 Распределение толщины трубы

Из полученных результатов видно, что углепластиковая труба двухсоставная, так как было обнаружено два шва на расстоянии 180 градусов или 80 мм по окружности. На расстоянии 10 мм от края трубы находится 2 мм утолщение, протяжённостью 5 мм. На расстояние 25 мм от края толщина трубы становится однородной равной примерно 1 мм.

Была проведена экспериментальная апробация разработанного метода, по результатам которой можно сделать следующие выводы:

Установка работает корректно и позволяет выполнять измерения толщины стенки труб из углепластика с требуемой чувствительностью. Результаты измерений показывают разброс толщины стенки трубы в пределах ± 100 мкм от исходной толщины, не учитывая обнаруженного 2 мм утолщения..

Анализ результатов, полученных для перекрываемых областей сканирования, позволяет утверждать о хорошей стабильности работы установки, в частности, механической части, интенсивности источника рентгеновского излучения и разработанной программы управления.

Обнаружены корреляции областей с уменьшенной толщиной стенки в местах расположением «шва» трубы.

Показано, что чувствительность установки может достигать разрешения измеряемой толщины стенки трубы порядка 10 мкм при пространственном разрешении 0.79 мм² и времени измерения толщины одной области трубы порядка 10 с.

Результаты показывают, что плотность материала трубы можно оценить равной 1.75 г/см³ в рамках приближения, при котором труба полностью состоит из углерода.