

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЕГКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. И.А. Кишин^{1,2,*}, Е.Ю. Киданова^{1,**}, А.С. Кубанкин^{1,2,***}, В.С. Сотникова^{3,****}

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ БелГУ), Россия
308015 Белгород, ул. Победы, 85

² Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),
Россия 119991 Москва, Ленинский проспект, 53

³ Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова (БГТУ),
Россия 308012 Белгород, ул. Костюкова, 46

E-mail: *ivan.kishin@mail.ru; **28kidanova28@gmail.com;
askubankin@gmail.com; *levultra@gmail.com

Поступила в редакцию 14.06.2023; после доработки 01.09.2023

Принята к публикации 04.09.2023

Описана методика неразрушающего контроля для исследования конструкционных элементов, изготовленных из легких материалов. Методика основана на анализе спектров мягкого рентгеновского излучения. Приведены результаты испытаний для трубы, изготовленной из углепластика, со средней толщиной стенки 1 мм. Показана возможность построения карт распределения толщин стенки трубы с точностью выше 10 мкм.

Ключевые слова: рентгеновская дефектоскопия, мягкое рентгеновское излучение, полупроводниковый детектор, определение толщины, методика неразрушающего контроля.

QUALITY CONTROL TECHNIQUE FOR STRUCTURAL ELEMENTS FROM LIGHTWEIGHT MATERIALS BASED ON SOFT X-RAY RADIATION

I.A. Kishin^{1,2,*}, E.Y. Kidanova^{1,**}, A.S. Kubankin^{1,2,***}, V.S. Sotnikova^{3,****}

¹Belgorod State National Research University (NRU BelSU),
Pobedy str.,85, Belgorod, 308015, Russia

²Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (FIAN),
Leninsky Ave.,53, Moscow, 119991, Russia

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (NRU BelSU),
Kostyukova str., 46, Belgorod, 308012, Russia

The paper describes a quality of non-destructive testing for the study of structural elements made of lightweight materials. The quality is based on the analysis of soft X-ray spectra. The test results for a pipe made of carbon fiber with an average wall thickness of 1 mm are presented. The possibility of constructing maps of the distribution of pipe wall thicknesses with an accuracy above 10 microns is shown.

Keywords: X-ray flaw detection, soft X-ray radiation, semiconductor detector, thickness determination, non-destructive testing technique.

DOI: 10.31857/S0130308223100044, EDN: WZRLYQ

ВВЕДЕНИЕ

Контроль прочностных и массогабаритных характеристик конструкционных элементов является обязательной процедурой при разработке деталей установок. В настоящее время широко используются следующие методы неразрушающего контроля качества конструкций [1—12]: акустико-эмиссионный, акустический, рентгеноскопия, термография, гидравлическое испытание, широгграфия и т.д. Выбор метода дефектоскопии зависит от свойств исследуемого объекта и требуемой точности результата.

На данный момент самым распространенным методом контроля качества трубопроводов из легких композитных материалов является акустико-эмиссионный метод дефектоскопии, основанный на обнаружении и анализе акустических волн, генерируемых дефектами внутри образца.

Из всех имеющихся методов дефектоскопии отдельного внимания заслуживает рентгенодефектоскопия [10, 11], которая наравне с акустико-эмиссионным методом [12] может использоваться непосредственно в процессе производства исследуемых конструкций. Однако, в отличие от метода акустической эмиссии, рентгенодефектоскопия позволяет обнаруживать дефекты как на поверхности, так и внутри материала. Преимуществом рентгенодефектоскопии является ее применимость к широкому кругу материалов, включая металлы, пластик и различные виды композитов. Проведение испытаний с помощью рентгеновского излучения практически не зависит от внешних факторов, таких как влажность, температура и освещение.

В большинстве случаев рентгенодефектоскопия применяется для проверки целостности и пригодности металлических конструкций, например, сварных швов трубопроводов [13]. При этом актуальной задачей остается разработка новых способов реализации метода рентгенодефектоскопии для трубопроводов из легких композитных материалов.

В настоящей работе описана новая методика неразрушающего рентгеновского контроля и разработан экспериментальный стенд для исследования конструктивных элементов, изготовленных из легких материалов. Методика основана на анализе характеристических пиков в области спектра мягкого рентгеновского излучения. Установка работает в энергетическом диапазоне от 1 до 10 кэВ в режиме энергодисперсионного анализа сигнала рентгеновского излучения, прошедшего через исследуемый объект и рассеянного объектом. Тестовые испытания, выполненные на трубе диаметром 48,4 мм и со средней толщиной стенки 1 мм, изготовленной из углепластика (карбон), показали возможность построения карт распределения толщин стенки трубы с точностью выше 10 мкм.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ

При прохождении рентгеновского излучения через слой вещества интенсивность прошедшего через материал излучения уменьшается относительного начальной за счет рассеяния и поглощения в этом веществе. Для определения интенсивности монохроматического излучения, прошедшего через слой рассматриваемого вещества, используют следующее выражение:

$$N = N_0 \times e^{-\mu \times L}, \quad (1)$$

где N_0 — интенсивность первичного рентгеновского излучения; L — толщина поглощающего слоя вещества; μ — линейный коэффициент ослабления, определяемый по формуле $\mu = 1/L_{abs}$, где L_{abs} — длина фотопоглощения монохроматического рентгеновского излучения.

Если известен начальный поток рентгеновского излучения и поток излучения после прохождения его через слой рассматриваемого вещества, с помощью выражения (1) для определенной энергии излучения можно вычислить толщину ослабляющего слоя L , используя следующее уравнение:

$$L = -\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \times L_{abs}. \quad (2)$$

Выражение (2) можно использовать для определения толщины исследуемого объекта, подбрав энергию рентгеновского излучения таким образом, чтобы обеспечить его частичное поглощение материалом.

В работе была исследована труба, изготовленная из углепластика, с внешним диаметром 48,4 мм и со средней толщиной стенки 1 мм. Для оценки требуемого спектрального диапазона был проведен модельный расчет, в котором полагалось, что рассматриваемая труба полностью состоит из углерода с плотностью 1,6 г/см³. На рис. 1 представлены результаты модельного расчета длин фотопоглощения рентгеновского излучения в спектральном диапазоне 1—10 кэВ для углерода. Также пунктирной линией обозначена зависимость длины фотопоглощения от энергии излучения для пленки полиэтилентерефталата (майлар) с плотностью 1,4 г/см³. Из представленных данных видно, что длины фотопоглощения майлара и углерода близки по своему значению, поэтому в работе будем считать их идентичными. Обертывание трубы пленкой, изготовленной из майлара (толщина 40 мкм), позволило варьировать толщину стенки трубы и тем самым оценить разрешающую способность предлагаемой методики.

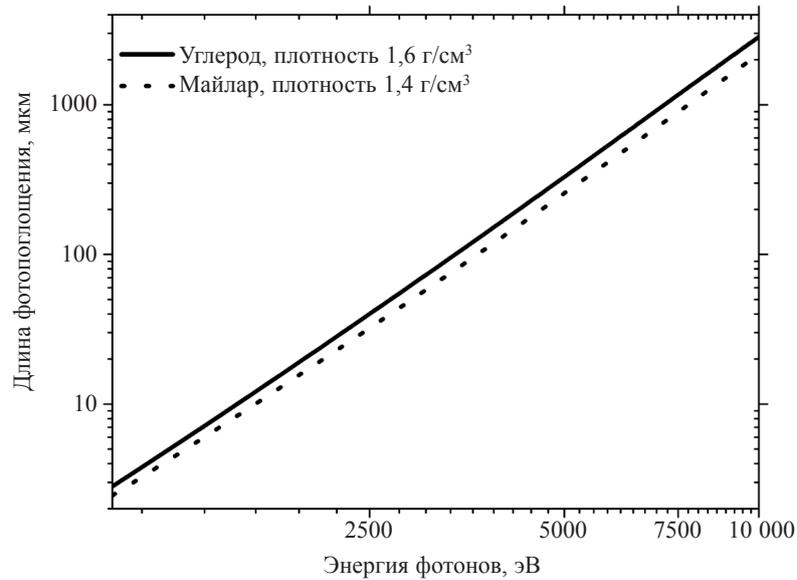


Рис. 1. Зависимость длины фотопоглощения рентгеновского излучения, сплошная линия — в углероде плотностью 1,6 г/см³, пунктирная линия — в майларе плотностью 1,4 г/см³, для расчета использовалась база данных [14].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Учитывая специфику данной методики, для определения толщины стенки трубы необходимо, чтобы в разработанной схеме измерений либо детектор, либо рентгеновский источник был размещен внутри исследуемой трубы. В связи с тем, что описываемая установка предполагает диагностику труб с малым диаметром, было решено использовать схему, в которой детектор размещен внутри трубы (рис. 2), что существенно облегчило процесс измерений.

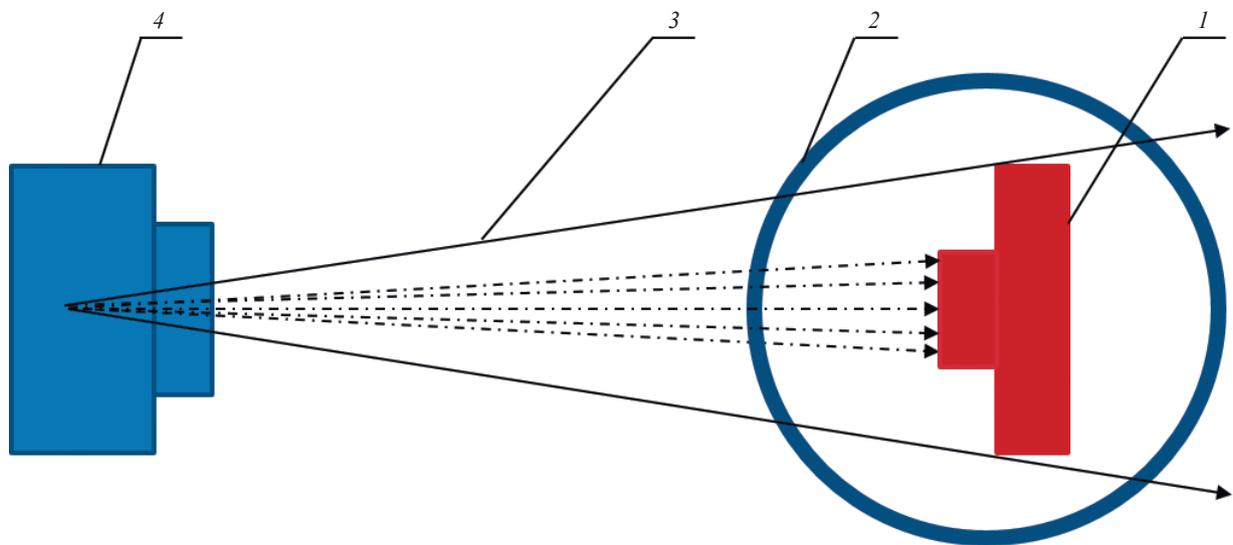


Рис. 2. Схема измерений: 1 — детектор; 2 — труба; 3 — рентгеновское излучение; 4 — рентгеновская трубка.

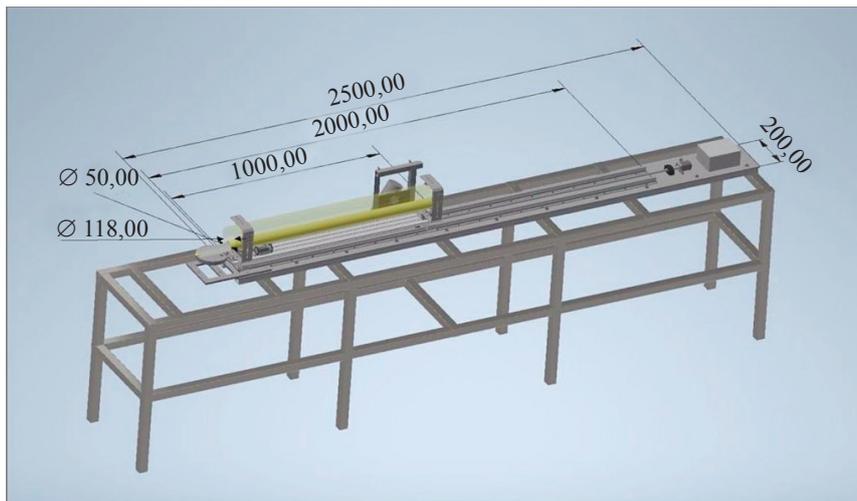


Рис. 3. Изображение экспериментального стенда.

Модель изготовленного стенда приведена на рис. 3. На плите размером $2,5 \times 0,2$ м² размещены рельсы длиной 2 м, по которым происходит перемещения плиты длиной 1 м с помощью моторизованного привода. Детектор и рентгеновская трубка закреплены жестко таким образом, чтобы выходное окно рентгеновской трубки (РТ) было направлено на входное окно детектора.

Измерительный узел показан на рис. 4а. Диагностируемая труба (1) устанавливается на позицию для измерений таким образом, чтобы установленный на креплении (2) детектор (3) с коллиматором (4) полностью разместился в исследуемой трубе, на которую будет направлено рентгеновское излучение (5) от РТ (6). Осесимметричное вращение трубы осуществляется за счет специального роликового держателя (7) и моторизованного ролика (8), крепления позволяют устанавливать трубы с диаметром от 45 до 118 мм.

Управление моторизованными приводами выполняется с помощью установленного на плите силового драйвера, управление которым производится оператором в зависимости от выбранного режима измерений с помощью специализированного программного обеспечения (ПО), написанно-

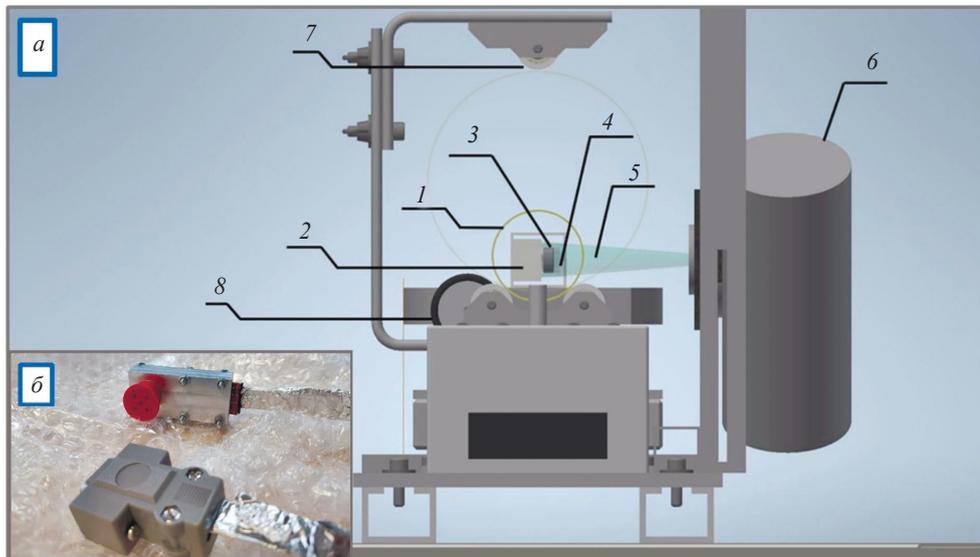


Рис. 4. Измерительный узел (а): 1 — диагностируемая труба; 2 — держатель детектора; 3 — рентгеновский спектрометр; 3 — свинцовый коллиматор; 5 — область рентгеновского излучения; 6 — рентгеновская трубка; 7 — роликовый держатель; 8 — привод вращательного движения; используемый детектор (б).

го специально для описываемой установки [15]. Созданная программа в режиме сканирования реализует вращение и линейное перемещение трубы, в то время как детектирующая система остается неподвижной. ПО позволяет задавать область сканирования, время и шаг одного измерения. С помощью ПО также осуществлялось управление рентгеновским детектором.

В описываемом экспериментальном стенде был использован рентгеновский спектрометр X-123 FastSDD комплектации OEM компании Amptek [16], состоящий из полупроводникового дрейфового детектора FastSDD с бериллиевым окном 12,5 мкм, предусилителя RA210 и платы управления DP5. Выбранный полупроводниковый детектор обладает высокой скоростью счета более 1 000 000 имп/с при сохранении высокого разрешения. Можно отметить, что ранее детектор хорошо себя зарекомендовал и использовался в экспериментальных работах по исследованию рентгеновского излучения на ускорительных комплексах релятивистских электронов [17] и ультра-релятивистских электронов [18]. В процессе проведения испытаний время формирования сигнала составляло 0,8 мкс, что обеспечивало эффективность регистрации фотонов более чем 95 % в спектральной области K_{α} -линий хрома. Дополнительно на спектрометр был установлен свинцовый коллиматор с апертурой 1 мм.

Корпус для детектора и предусилителя был изготовлен таким образом, чтобы входное окно детектора было направлено на выходное окно рентгеновской трубки, не препятствуя при этом перемещению трубы. Благодаря этому получилась компактная комплектация детектора, отличающаяся малыми габаритами $65 \times 25 \times 25$ мм³ и сохраняющая спектрометрические характеристики (рис. 4б). Созданный корпус позволяет проводить исследования труб с диаметром от 45 до 118 мм.

Исходя из результатов, продемонстрированных на рис. 1, и с учетом того, что толщина стенки исследуемой трубы может быть достаточно большой, а время измерений должно быть минимальным, оптимальным вариантом было использование РТ с хромовым анодом. Энергия характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) K_{α} -линии хрома соответствует значению 5,41 кэВ. Согласно проведенному моделированию, величина длины фотопоглощения в углероде для данной энергии составляет 430 мкм. В качестве источника рентгеновского излучения использовалась РТ фирмы Oxford Instruments 5000 серии с хромовым анодом [19], основные характеристики которой представлены в табл. 1. Во время эксперимента использовались следующие настройки РТ: ускоряющее напряжение 9 кВ, ток эмиссии 20 мкА. Расстояние от РТ до рентгеновского спектрометра составляло 130 мм.

Таблица 1

Характеристики рентгеновской трубки Oxford Instruments 5000 серии

Характеристики	Значения
Диапазон высокого напряжения	От 5 до 50 кВ
Максимальная мощность	50 Вт
Максимальный ток пучка	1,0 мА
Размер фокусного пятна	200 мкм
Материал и толщина окна	Ве, 127 мкм
Размеры	180 мм Д × Ø 70 мм
Анод	Хром

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТЕНДА

Определение длины фотопоглощения в материале. Тестовые испытания проводились на участке углепластиковой трубы с внешним диаметром 48,4 мм и средней толщиной стенки 1 мм. Поскольку точный элементный состав и плотность материала трубы были неизвестны, то на первом этапе испытаний были использованы следующие приближения: элементный состав трубы неизменный по всему объему, начальная толщина стенки равна 1 мм. Данные приближения могут быть использованы для оценки отклонения толщины стенки трубы на основе разрабатываемого подхода.

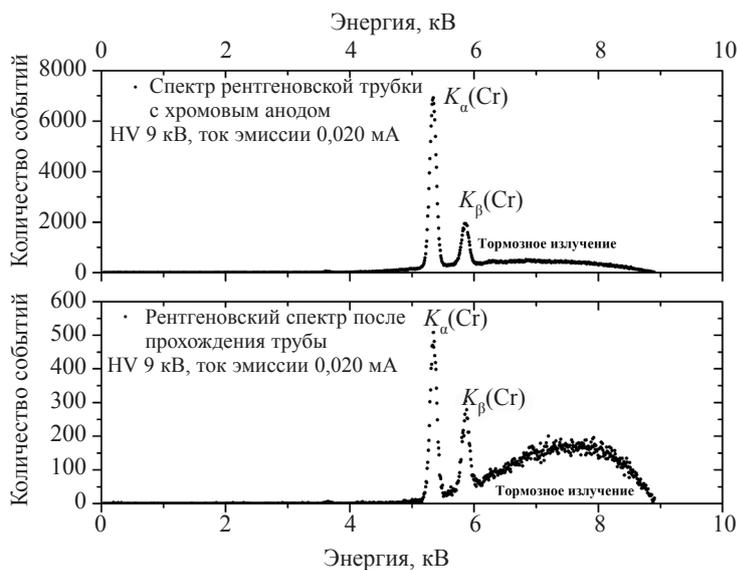


Рис. 5. Спектры рентгеновского излучения: спектр рентгеновской трубки (сверху); спектр излучения, прошедшего через стенку трубы (снизу).

Одной из характеристик рассматриваемой задачи является длина фотопоглощения в материале трубы. Для определения данной характеристики были выполнены измерения спектров рентгеновского излучения без стенки и излучения, ослабленного одной стенкой трубы. Стенка помещалась между РТ и рентгеновским спектрометром, при этом все остальные параметры проведения измерений были неизменными, а именно: геометрия измерений, размеры коллиматора, настройки рентгеновской трубки.

Измерение спектра РТ в отсутствие стенки, выполненное в течение 15 с, показало интегральное число фотонов 109997 и 36211 для K_{α} - и K_{β} -линий хрома соответственно. Аналогичные измерения с ослаблением излучения одной стенкой трубы продемонстрировали значения 8000 и 5625 соответственно. На рис. 5 представлены измеренные спектры. Стоит отметить, что результаты измерений показали высокое энергетическое разрешение рентгеновского спектрометра 110 эВ в области энергий от 4 до 6 кэВ, что позволяет разделить вклады K_{α} - и K_{β} -линий хрома.

Используя формулу (2) и учитывая, что $L \approx 1$ мм (толщина стенки трубы), находим длину фотопоглощения $L_{abs} = 382$ мкм для энергии фотонов 5,41 кэВ и $L_{abs} = 537$ мкм для 5,95 кэВ. Учитывая полученные результаты измерений и используя приближение, в котором полагается, что труба состоит только из углерода, с помощью базы данных [14] была определена плотность материала трубы, которая составила $\sim 1,75$ г/см³.

Определения толщины стенки углепластиковой трубы. В первой серии измерений толщины стенки трубы детектор находился на расстоянии 15 мм от торца трубы. Измерения спектра излучения, прошедшего через трубу, выполнялись в режиме сканирования по окружности с шагом по внешней поверхности трубы 1 мм, что соответствовало $2,368^{\circ}$ — труба вращалась вокруг собственной оси при неизменном положении рентгеновской трубки и рентгеновского спектрометра. Геометрия эксперимента позволила выполнить измерение средней толщины цилиндрического фрагмента стенки трубы диаметром около 1 мм. С учетом того, что длина окружности внешней поверхности трубы равна 152 мм, для полного сканирования было необходимо провести 152 измерения. Для проверки корректности полученных результатов количество измеряемых точек было увеличено на 7, что позволило сопоставить первые и последние 7 точек измерений, которые должны быть идентичными. Перед началом измерений фиксировалось положение визуально наблюдаемой области трубы, в которой предположительно был продольный шов. Данная область имела форму полосы и визуально наблюдалась вдоль поверхности трубы с одной или двух сторон в зависимости от участка трубы. Результаты измерений суммарного числа фотонов K_{α} -линий хрома для каждой точки сканирования представлены на рис. 6а.

Из представленных результатов видна неоднородность зарегистрированного сигнала, при этом максимум распределения наблюдается в области шва, что указывает на пониженную плотность вещества, т.е. уменьшение толщины стенки трубы или наличие каких-либо дефектов. Также

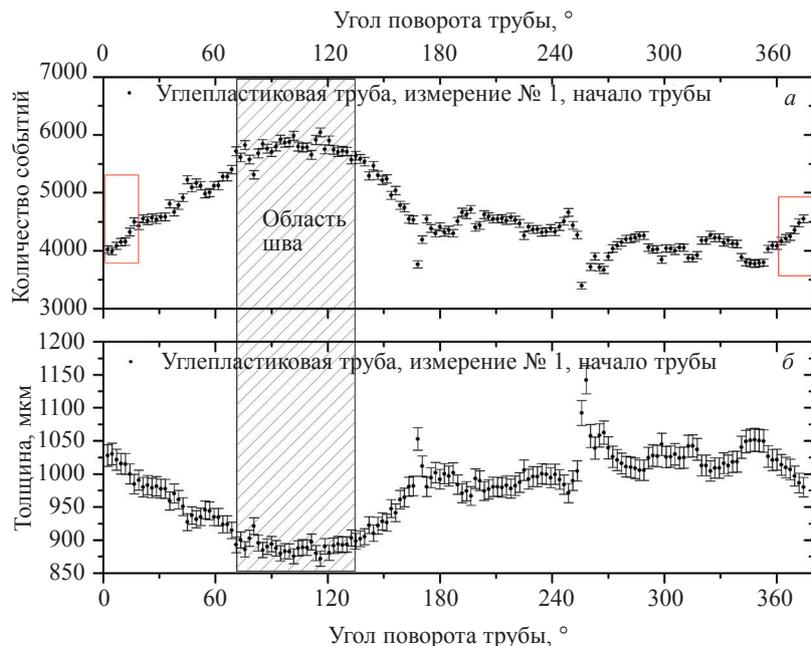


Рис. 6. Серия измерений № 1: *a* — результаты измерений суммарного числа фотонов K_{α} -линий хрома для каждой точки сканирования трубы из углепластика; *b* — результаты измерений толщины стенки трубы из углепластика, выполненные на основе поглощения K_{α} -линий хрома. Красные прямоугольники — перекрывающиеся при вращении трубы области измерений.

можно отметить хорошую повторяемость результатов для перекрываемых областей (прямоугольники) по форме и уровню сигнала. Пересчет результатов измерений в толщину стенки с помощью формулы (2) дает результаты, представленные на рис. 6б.

Во второй серии измерений расстояние от края трубы до детектора составляло 130 мм. Измерения проводились аналогично первой серии измерений, полученные данные суммарного числа фотонов K_{α} -линий хрома для каждой точки сканирования представлены на рис. 7а. На рис. 7б представлен

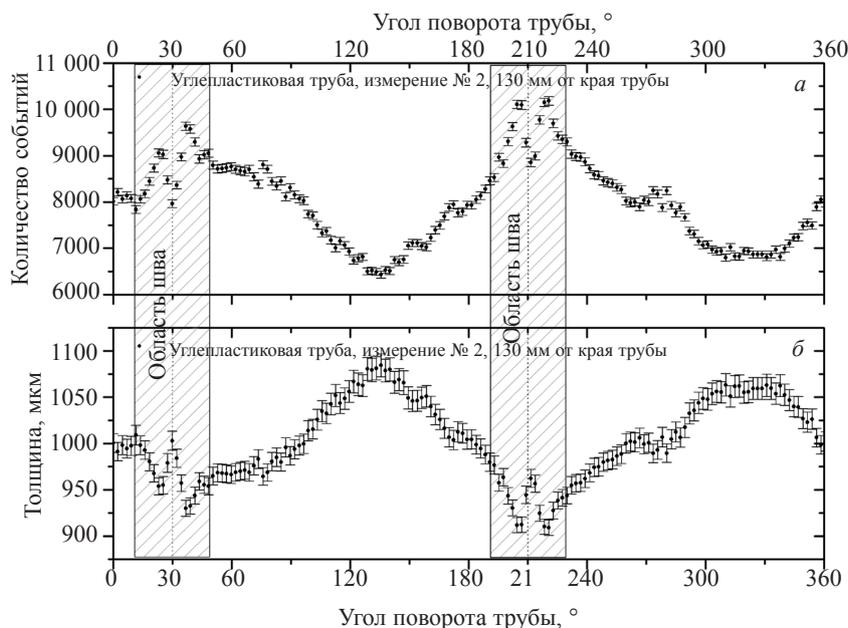


Рис. 7. Серия измерений № 2: *a* — результаты измерений суммарного числа фотонов K_{α} -линии хрома для каждой точки сканирования трубы из углепластика; *b* — результаты измерений толщины стенки трубы из углепластика, выполненные на основе поглощения K_{α} -линий хрома.

результат пересчета по формуле (2) в величину толщины стенки трубы. Погрешность измерений составила 10 мкм. Представленные зависимости показывают схожий характер распределения концентрации вещества в стенке трубы с результатами первой серии эксперимента, за исключением появления второго пика в измеренном распределении. Расстояние между двумя пиками составило 180° .

Задачей третьей серии измерений являлась проверка чувствительности предлагаемого подхода. В измерениях использовались настройки, идентичные второй серии измерений. Для решения данной задачи внешняя поверхность трубы была обернута одним слоем пленки майлара толщиной 60 мкм, при этом между смыкающимися краями был оставлен промежуток около 2 мм. Результаты измерений приведены на рис. 8а.

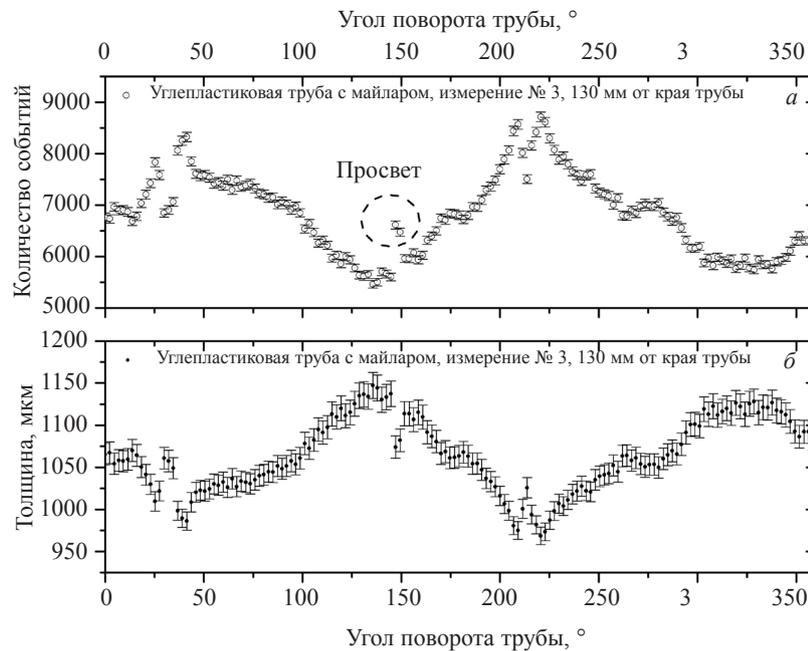


Рис. 8. Серия измерений № 3: *a* — результаты измерений суммарного числа фотонов K_α -линий хрома для каждой точки сканирования трубы из углеродистика; *b* — результаты измерений толщины стенки трубы из углеродистика, выполненные на основе поглощения K_α -линий хрома.

Положение трубы, при котором рентгеновское излучение взаимодействовало с промежутком, оставленным в месте стыка краев пленки майлара, можно определить по увеличению числа событий на кривой на рис. 8а (обозначено овалом). Видно, что в данной области число зарегистрированных фотонов резко возрастает: на графике отчетливо продемонстрировано, что разница пика с подложкой составляет около 5 статистических ошибок, что достаточно для убедительной интерпретации полученных данных.

Результат расчета величины толщины стенки трубы, выполненного по формуле (2) с допущением, что фотопоглощение в майларе и трубе одинаковое для данной энергии, представлен на рис. 8б. Измеренная максимальная толщина стенки трубы, обернутой майларом, равна $1,14 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$, а минимальная толщина $0,96 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$. В случае, когда измерялась только труба, максимальная толщина трубы составила $1,08 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$, а минимальная толщина составила $0,90 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$.

При тех же режимах работы экспериментального стенда был просканирован участок трубы длиной 70 мм. Сканирование проходило в автоматическом режиме, используя программу, описанную выше. Полученная тепловая карта представлена на рис. 9. Полученное изображение указывает на наличие неоднородности трубы, а именно на присутствие двух продольных швов и осесимметричного «порожка» высотой $\sim 2 \text{ мм}$, толщина которого дополнительно измерялась штангенциркулем. На рис. 9 продольным швам соответствует светлоголубая область, а «порожку» — красная.

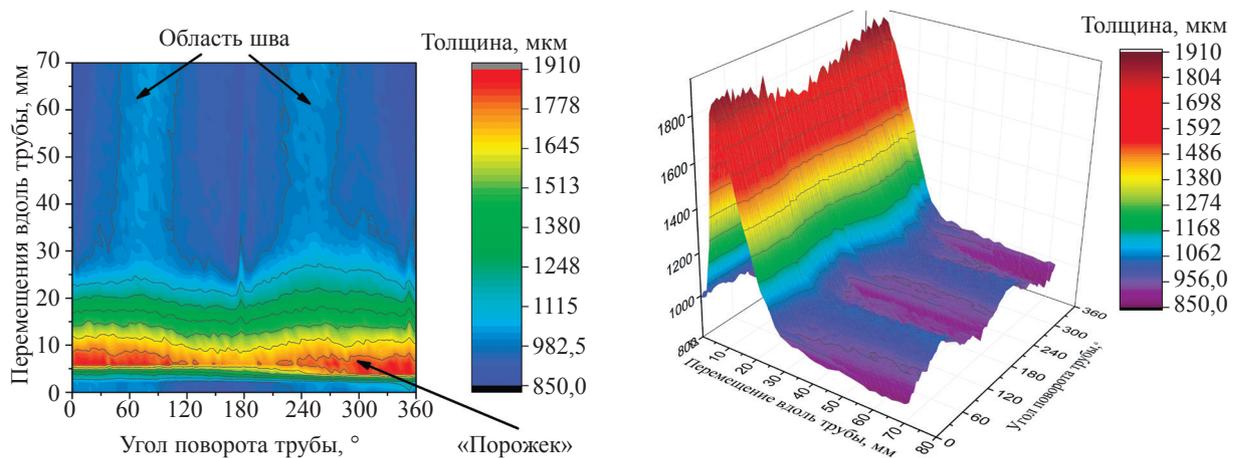


Рис. 9. Серия измерений № 4: автоматическое сканирование участка трубы: продольные швы — светлоголубая область, «порожек» — красная область.

ВЫВОДЫ

Разработана новая методика неразрушающего контроля [20] для исследования конструкционных элементов, изготовленных из легких материалов. Апробация методики, выполненная на созданном экспериментальном стенде, предоставила возможность выполнять измерения толщины стенки труб из углепластика с требуемой чувствительностью. В частности, для трубы длиной 100 см, внешним диаметром 48 мм и средней толщиной стенки 1 мм, изготовленной из углепластика, проведенные измерения демонстрируют разброс толщины стенки трубы в пределах ± 100 мкм от средней толщины, не учитывая «порожек» высотой 2 мм. Были обнаружены корреляции областей с уменьшенной толщиной стенки и расположением «швов» трубы. Показано, что чувствительность измерений может достигать разрешения исследуемой толщины стенки труб порядка 10 мкм при пространственном разрешении $0,78 \text{ мм}^2$ и времени измерения толщины одной области трубы порядка 10 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части государственного задания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020—0032 (2019—1569).

Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gholizadeh S.* A review of non-destructive testing methods of composite materials // *Procedia Structural Integrity*. 2016. V. 1. P. 50—57.
2. *Jian Chen, Zhenyang Yu, Haoran Jin.* Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in fiber-reinforced polymer composites: A review // *Sec. Polymeric and Composite Materials*. 2022. V. 9.
3. *Нагинаев К.Е., Савельев В.Н.* Акустико-эмиссионный контроль трубопроводной модели при циклическом и статическом нагружении // *Известия вузов. Машиностроение*. 2007. № 6. С. 54—57.
4. *Данилов В.Н., Ушаков В.М., Рымкевич А.И.* Исследование возможностей оценки состояния структуры металла трубопроводов, находившихся в эксплуатации, ультразвуковым методом // *Дефектоскопия*. 2021. № 8. С. 3—13.
5. *Князюк Л.В., Круглова Е.В.* Определение размеров дефектов сварных соединений по сканированным рентгеновским снимкам // *Дефектоскопия*. 2004. С. 71—75.
6. *Fernandes H., Hai Zhang, Figueiredo A., Ibarra-Castanedo C., Gilmar Guimaraes, Maldague X.* Carbon fiber composite inspection and defect characterization using active infrared thermography: numerical simulations and experimental results // *Applied Optics*. 2016. V. 55. No. 34.
7. *Вартанов А.З., Набатов В.В.* Термографический контроль для строительства (обзорная статья) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № 9. С. 192—200.
8. *Гулинин Д.А., Битаева М.В., Гундорова И.Г., Еговцева В.А.* Особенности проведения гидравлических испытаний трубопроводов в условиях отрицательных температур окружающей среды // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2021. № 5—6. С. 54—59.

9. *Benedet E., Fantin V., Willeman P., Junior A., Schmitz C., Cibra d'Almeida F., Soares S., Lana D., Perrot V.* The use of Shearography technique to evaluate polymeric composite repairs — case study // *Revista Materia*. 2017. V. 22. No. 2.
10. *Тарасов С.Ю., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Гнюсов С.Ф., Кудинов Ю.А.* Рентгеноскопия дефектов типа стыковой линии в сварном шве, полученном методом сварки трением с перемешиванием // *Дефектоскопия*. 2015. № 9. С. 61—69.
11. *Потрахов Н.Н., Жамова К.К., Бессонов В.Б., Грязнов А.Ю., Ободовский А.В.* Технология оперативного рентгеновского контроля изделий из полимерных композиционных материалов // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2015. № 43. С. 97—115.
12. *Елизаров С.В., Терентьев Д.А., Медведев К.А., Иванов В.И., Халимов А.Г., Бардаков В.В.* Акустико-эмиссионная диагностика стеклопластиковых труб и фитингов // *Контроль. Диагностика*. 2021. Т. 24. № 1. С. 12—25.
13. *Шлеенков А.С., Новгородов Д.В., Коновальчук В.О.* Исследование дефектов продольного сварного шва трубы // *Физика. Технологии. Инновации: сборник статей VIII Международной молодежной научной конференции*. 2021. С. 307—314.
14. *Henke B., Gullikson E., Davis J.* X-ray interactions: Photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\text{--}30,000\text{ eV}$, $Z = 1\text{--}92$ // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1993. V. 54. Iss. 2. P. 181—342.
15. *Кищин И.А., Кубанкин А.С., Кубанкина А.А., Нажмудинов Р.М., Дроник В.И., Козаченко А.О.* Патент № 2022613325. Программа управления установкой для диагностики толщины пластиковых и углеродных труб. № 2022612782. Заявл. 02.03.2022. Оpubл. 14.03.2022. 1 с.
16. Amptek, OEM Solutions for XRF Systems. URL: <http://www.amptek.com/products/x-ray-detectors/oem-xrf-solutions/oem-solutions-for-xrf-systems> (дата обращения: 13.06.2023).
17. *Алексеев В.И., Астапенко В.А., Елисеев А.Н., Иррибарра Э.Ф., Карпов В.А., Кищин И.А., Кротов Ю.А., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Аль-Омари М., Сахно С.В.* Исследование механизмов генерации рентгеновского излучения при взаимодействии релятивистских электронов с веществом на установке «Рентген 1» // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2017. № 7. С. 13—18.
18. *Nazhmudinov R.M., Shchagin A.V., Kishin I.A., Kubanin A.S., Trofymenko S.V., Potylitsyn A.P., Gogolev A.S., Filatov N.A., Kube G., Potylitsina-Kube N.A., Stanitzki M., Novokshonov A.* K-shell ionization cross section of Ti and Cu atoms by 1 and 2 GeV electrons // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2021. V. 54. No. 4. P. 045201.
19. Oxford Instruments. Jupiter 5000 Series Radiation Shielded X-ray Tube. URL: <https://xray.oxinst.com/x-ray-tube-products/x-ray-tube-assembly-radiation-shielded/jupiter-5000-series> (дата обращения: 13.06.2023).
20. *Кищин И.А., Кубанкин А.С., Кубанкина А.А., Фирсов Д.Г.* НОУ-ХАУ № 426. Способ контроля качества конструкционных материалов, изготовленных из легких элементов. Заявл. 02.06.2022. Оpubл. 29.06.2022. 1 с.