

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 620.179.15

*ОСИПОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, канд. техн. наук, вед. научный сотрудник,
osip1809@rambler.ru*

*Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,*

*КЛИМЕНОВ ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
klimenov@tsuab.com*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,*

*Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

*БАТРАНИН АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, мл. научный сотрудник,
batranin@tpu.ru*

*ШТЕЙН АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ, аспирант,
shteyn@tpu.ru*

*Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,*

*ПРИЩЕПА ИНГА АЛЕКСАНДРОВНА, аспирант,
ingaprishpea@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ*

Рассмотрены особенности применения цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии в строительстве и производстве строительных материалов. Приведены примеры использования цифровой радиографии для контроля механического соединения арматуры обжимными муфтами; стальных канатов. Представлены результаты экспериментальной оценки внутренней структуры пенобетона и стальных канатов методом

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности и проекта РФФИ № 13-08-98027.

Исследования выполнены при финансовой поддержке работ по проекту по Постановлению Правительства РФ № 218 от 9.04.2010 (№ проекта 02.G25.31.0022).

трехмерной рентгеновской вычислительной томографии. Доказана эффективность применения методов цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии на стадии отработки технологий изготовления конструктивных элементов и строительных материалов.

Ключевые слова: цифровая радиография; рентгеновская вычислительная томография; арматура; стальные канаты; пенобетон.

*SERGEY P. OSIPOV, PhD, Lead Research Scientist,
osip1809@rambler.ru*

*Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia,
VASILII A. KLIMENOV, DSc, Professor,*

*klimenov@tsuab.com
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia,*

*Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia*

*ANDREI V. BATRANIN, Junior Research Scientist,
batranin@tpu.ru*

*ALEKSANDR M. SHTEIN, Research Assistant,
shteyn@tpu.ru*

*Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia,*

*INGA A. PRISHCHEPA, Research Assistant,
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

DIGITAL RADIOGRAPHY AND X-RAY COMPUTERIZED TOMOGRAPHY IN BUILDING CONSTRUCTION AND CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

The paper presents the digital radiography and X-ray computerized tomography applications in construction and production of construction materials. Mechanical rebar splicing and steel wire rope coupling is controlled by the digital radiography technique. Experimental results are given for the internal structure of foam concrete and steel wire ropes using the three-dimensional model of X-ray computerized tomography. The efficiency of the digital radiography and X-ray computerized tomography techniques is proved by the fine-tuning production technology of structural members and construction materials.

Keywords: digital radiography; X-ray computerized tomography; reinforcement; steel wire ropes; foam concrete.

Введение

В промышленном, жилищном и транспортном строительстве и производстве строительных материалов существует ряд задач, для решения которых эффективно применяются различные реализации цифровой радиографии (ЦР), радиометрии и рентгеновской вычислительной томографии (РВТ). К таким задачам относятся [1–7]: обнаружение, идентификация и оценка критичности де-

фектов; контроль состояния арматуры в железобетонных изделиях; измерение плотности, пористости; оценка однородности структуры строительных материалов. Применение радиационных методов в строительстве и строительном материаловедении существенно ограничивается особенностями объектов контроля (ОК), среди которых следует выделить: значительные размеры (бетонные и железобетонные изделия); наличие технологических фрагментов (арматура); сложность детерминированной (витые изделия) или стохастической структуры (бетон, пенобетон, полимербетон). Другая группа ограничений связана с потенциальной опасностью ионизирующих излучений и высокими требованиями к производительности контроля, вероятности обнаружения разнообразных дефектов и геометрическому разрешению. Острота части проблем, из указанных выше, применительно к контролю крупногабаритных объектов может быть существенно снижена за счёт применения современных источников высокоэнергетического рентгеновского излучения, например, малогабаритных импульсных бетатронов, спроектированных и производимых в Томском политехническом университете [8, 9]. В настоящее время выпускаются бетатроны с энергией рентгеновского излучения от 4 до 9 МэВ и мощностью от 2 до 20 сГр/мин. Другим фактором, который может существенно повлиять на производительность и геометрическое разрешение проектируемых систем ЦР и РВТ, является появление на рынке высокоэффективных регистраторов рентгеновского излучения [10]: запоминающих фосфорных пластин; сцинтилляционных экранов в комплекте с цифровыми преобразователями световых изображений; линеек и матриц радиометрических детекторов. Каждый тип регистраторов обладает своим набором достоинств и недостатков, и выбор регистратора определяется тем, какая характеристика или группа характеристик проектируемого комплекса ЦР является наиболее значимой [11] для потребителя. Существенно повысить качество систем ЦР и РВТ позволяют также высокопрецизионные системы перемещения и позиционирования, которые встраиваются в проектируемые комплексы. Метод РВТ в настоящее время применяется для обработки эффективных технологий многих высококачественных строительных материалов [5, 6, 12]: бетонов ответственного назначения, пенобетонов, полимербетонов. В литературе в неполной мере рассмотрены вопросы, связанные с применением методов ЦР и РВТ с учетом специфики ОК применительно к строительству и производству строительных материалов. На первом этапе остановимся подробнее на основах формирования конечных изображений в системах ЦР и РВТ.

1. Основы цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии

1.1. Формирование изображений в цифровой радиографии

Существует несколько реализаций метода ЦР, среди которых отметим сканирующую цифровую радиографию (СЦР) и цифровую радиографию с регистрацией излучения матрицей (МЦР) радиометрических детекторов.

Системы МЦР являются лидерами по критерию производительности [11], но их применение затруднено при контроле крупногабаритных ОК, т. к. возникает необходимость в формировании радиографических изображений, а затем сведении их в единое изображение. Кроме этого, матрица детекторов

регистрирует не только информативный поток нерассеянного рентгеновского излучения, но и поток излучения, рассеянного в ОК и от элементов конструкции радиографического комплекса и рабочего помещения. Стоимость также ограничивает применение матричных детекторов в строительстве. Соблюдается пропорциональная зависимость стоимости регистратора от числа составляющих его радиометрических детекторов.

В методе СЦР итоговое изображение формируется в результате просвечивания ОК перемещающимся щелевым пучком рентгеновского излучения. В качестве регистратора излучения традиционно выступает линейка детекторов. Производительность СЦР существенно меньше, чем систем ЦР с матричными детекторами. К достоинству СЦР следует отнести возможность применения ограничения пучка рентгеновского излучения коллиматором (системой коллиматоров), что приводит к значительному снижению вклада рассеяния в информативные сигналы с радиометрических детекторов. Одновременная коллимация источника и регистратора рентгеновского излучения является наиболее эффективной, причем щелевая коллимация всегда менее эффективна, чем коллимация каждого радиометрического детектора в отдельности [13]. Коллимация отдельно взятых детекторов сложна в реализации, особенно для плотноупакованных линеек детекторов. Размещение детекторов в две линии в шахматном порядке [13, 14] позволяет использовать коллиматоры для каждого радиометрического детектора. Дополнительным положительным моментом такой системы размещения детекторов и коллиматоров является снижение взаимного радиационного влияния детекторов друг на друга, что наиболее существенно для высокоэнергетической цифровой радиографии. Системы СЦР позволяют контролировать крупногабаритные объекты, указанные системы могут быть встроены в технологический процесс производства массовых изделий, например железобетонных плит.

Ниже обсудим вопрос формирования изображений в СЦР.

На рис. 1 приведена геометрическая схема сканирования ОК щелевым пучком рентгеновского излучения с двух ортогональных направлений *a* и *b*.

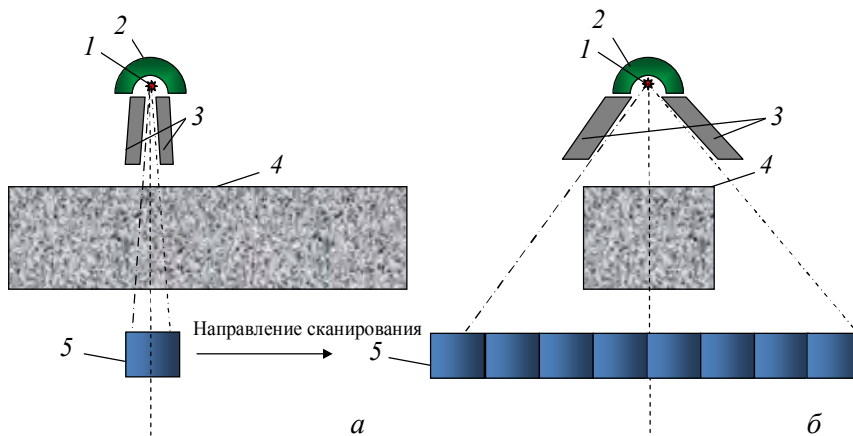


Рис. 1. Геометрическая схема сканирования:

1 – источник излучения; 2 – радиационная защита; 3 – щелевой коллиматор; 4 – объект контроля; 5 – линейка радиометрических детекторов

Для источника рентгеновского излучения с максимальной энергией E_{\max} аналоговый сигнал с радиометрического детектора, ассоциированного с элементом радиографического изображения в точке с координатами (y, z) , пропорционален интенсивности I излучения, зарегистрированного сцинтилляционным детектором толщиной h_{sc} .

Значение интенсивности I оценивается выражением

$$I(y, z) = N_0(x, y) \int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h_{sc}) e^{-\int_0^{h(y,z)} \mu(E, x, y, z) dx} dE. \quad (1)$$

Здесь $N_0(x, y)$ – интенсивность потока фотонов без ОК; $E_{ab}(E)$, $\varepsilon(E, h_{sc})$ – энергетические зависимости поглощенной энергии зарегистрированного фотона и эффективности регистрации фотонов; $h(y, z)$, $\mu(E, y, z)$ – лучевая толщина объекта по лучу, связывающему излучающую точку и точку детектирования, и энергетическая зависимость линейного коэффициента ослабления (ЛКО) фотонного излучения. Выражение (1) не учитывает собственные шумы детекторов, вклад которых на практике после оцифровки аналогового сигнала с использованием АЦП устраняется специальной калибровкой по «чёрному».

В системах ЦР применяются многоканальные детекторы, в каждом из которых поглощенная в детекторе энергия рентгеновского излучения трансформируется в световое излучение, преобразуемое фотоэлектронным преобразователем в электрический ток, который усиливается и поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Следует отметить, что в случае использования в системах цифровой радиографии импульсных источников рентгеновского излучения система детектирования дополняется опорным детектором, предназначением которого является снижение вклада в конечное изображение флуктуаций параметров излучения от импульса к импульсу. Для уменьшения различия коэффициентов усиления единичных детекторов применяют калибровку по «белому». На следующем этапе откалиброванный цифровой сигнал линейризуется логарифмированием. В формализованном виде связь конечного сигнала $P(y, z)$ с единичного канала регистратора с характеристикой ослабляющей среды описывается приближенным выражением

$$P(y, z) \approx \ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h_{sc}) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h_{sc}) e^{-\int_0^{h(y,z)} \mu(E, x, y, z) dx} dE}. \quad (2)$$

Конечный сигнал $P(y, z)$ имеет ярко выраженное физическое толкование – радиационная толщина объекта по лучу, связывающему излучающую точку и точку детектирования. В терминах эффективных энергий рентгеновского излучения $E_{эфф}$ выражение (2) примет вид

$$P(y, z) \approx \mu(E_{eff}(E_{\max}, h(y, z))) h(y, z). \quad (3)$$

Отметим, что некоторые сложности практического анализа и применения выражения (3) обусловлены зависимостью E_{eff} от максимальной энергии рентгеновского излучения E_{max} и толщины объекта контроля h .

1.2. Основы рентгеновской вычислительной томографии

Методы РВТ отличаются разнообразием, связанным со схемой получения исходных проекционных данных и с использованием регистраторов с линейками и матрицами детекторов. В настоящее время в различных отраслях науки и промышленности широко применяется метод трехмерной (3D) томографии, в котором в качестве регистратора рентгеновского излучения выступает матрица плотноупакованных детекторов. Упрощенная схема формирования первичных проекций для такого томографа приведена на рис. 2.

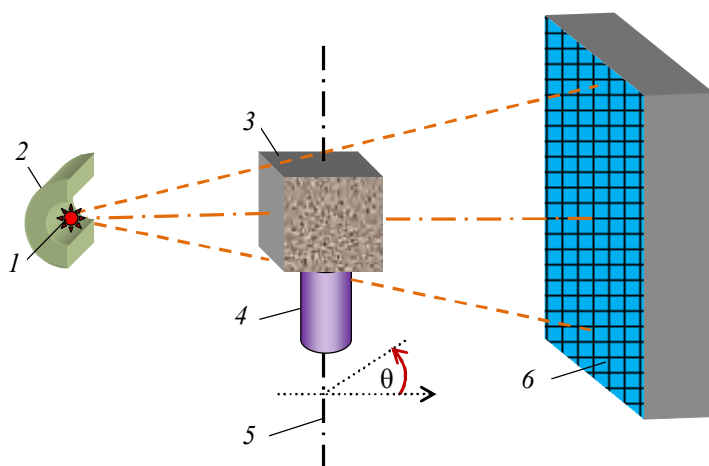


Рис. 2. Схема формирования проекций в 3D томографии:

1 – источник излучения; 2 – радиационная защита; 3 – объект контроля; 4 – предметный стол; 5 – ось вращения предметного стола; 6 – матрица радиометрических детекторов

Одна проекция для фиксированного угла θ в рассматриваемом методе представляет собой цифровое радиографическое изображение. Изменяя угол θ в диапазоне от 0 до 180° , формируют набор проекций

$$\int_0^{h(y,z,\theta)} \mu(E_{eff}, x, y, z, \theta) dx = P(y, z, \theta). \quad (4)$$

Система уравнений вида (4) для всей совокупности наборов (x, y, θ) , где точки (x, y) пробегают всю область S (элементы матрицы), имеет единственное решение относительно неизвестных $\mu(x, y, z)$, $(x, y, z) \in \mathbf{V}$, где \mathbf{V} – множество точек ОК. Полученное решение представляет собой трехмерное распределение ЛКО рентгеновского излучения с энергией E_{eff} по объему ОК. Существует значительное количество эффективных методов решения систем, основанных на уравнении (3), в условиях достаточности данных [15].

2. Экспериментальные исследования

2.1. Механические соединения арматуры обжимными муфтами

В современном строительстве повышаются требования к безопасности эксплуатации зданий и сооружений и повышенной устойчивости сооружений в условиях сейсмических воздействий, при этом все чаще применяют механические соединения стержневой арматуры с использованием обжимных муфт¹.

Отработка технологии производства соединения арматуры анализируемым способом невозможна без применения неразрушающих методов испытаний. В силу особенностей ОК единственным методом, с помощью которого можно исследовать ОК, является цифровая радиография. В качестве источника фотонного излучения могут быть использованы радиоизотопы, рентгеновские аппараты и бетатроны. Максимальный поперечный размер ОК составляет от 35 до 40 г/см². Для оценки принципиальной возможности анализа соединения арматуры на предмет выявления дефектов были получены радиографические изображения двух тестовых образцов ОК. Изображения сформированы с использованием системы ЦР на основе рентгеновского аппарата, излучающего фотоны с максимальной энергией 160 кэВ. Для повышения отношения «сигнал-шум» результирующее радиографическое изображение формировали в результате усреднения 16 кадров. Рентгеновское излучение регистрировали матричным детектором Remote RadEye 200 с размером пикселя 96 мкм. Объект испытаний был максимально приближен к матрице детекторов, поэтому геометрическое увеличение было незначительным. Эффективный размер пикселя составил 88–90 мкм.

На рис. 2, *а* и *б* приведены цифровые радиографические изображения объектов с максимальным поперечным размером 47 и 51 мм.



Рис. 2. Радиографическое изображение соединения арматуры с максимальным поперечным размером:
а – 47 мм; *б* – 51 мм

Из анализа изображений 2, *а* и *б* можно сформулировать выводы, связанные с оценкой параметров испытанных соединений арматуры.

1. С точностью 0,1 мм можно измерить расстояние между двумя соединяемыми фрагментами арматуры. Для образца, радиографическое изображение которого представлено на рис. 2, *а*, расстояние между фрагментами арматуры изменяется от 0,7 до 1,6 мм. Для образца на рис. 2, *б* указанное расстояние изменяется в пределах от 1,6 до 2,1 мм.

¹ РД ЭО 0657-2006. Положение по применению механических соединений арматуры для железобетонных конструкций зданий и сооружений атомных станций.

2. Наличие светлых пятен на границах контакта фрагментов арматуры и обжимных гильз свидетельствует о некачественном соединении.

3. В результате обработки радиографической информации можно оценить и дополнительные геометрические характеристики исследуемого соединения арматуры, например конечную длину и профиль обжатой муфты и т. п.

Заключение о дефектности или отсутствии дефектов в анализируемом виде соединения арматуры возможно только на основе нормативно-технической документации.

2.2. Стальные канаты

Стальные канаты широко применяются в коммунальном хозяйстве, строительстве, промышленности. Обеспечение безопасности и надежности стальных канатов на этапах их изготовления и эксплуатации невозможно без применения методов неразрушающих испытаний.

Для оценки эффективности методов ЦР и РВТ применительно к контролю стальных канатов была проведена серия экспериментов по получению изображений каната диаметром 25 мм для различных максимальных энергий рентгеновского излучения. Эксперименты проводились на установке ЦР и РВТ, разработанной в Томском политехническом университете. В качестве источника излучения использовался рентгеновский аппарат непрерывного действия MXR-451HP/11 (Comet AG, Швейцария) с минимальным размером фокусного пятна 0,4 мм, напряжением до 450 кВ, мощностью до 500 Вт.

В качестве регистратора была применена панель XRD 1622 (Perkin Elmer, США, сцинтиллятор CsI) с размером пикселя 200 мкм, предназначенная для регистрации высокоэнергетического рентгеновского излучения. Наилучшие результаты томографии и радиографии контроля (рис. 3, *а* и *б*) были получены при энергии излучения 200 кэВ с использованием медного фильтра толщиной 2 мм с проекционным увеличением в 2,2 раза.

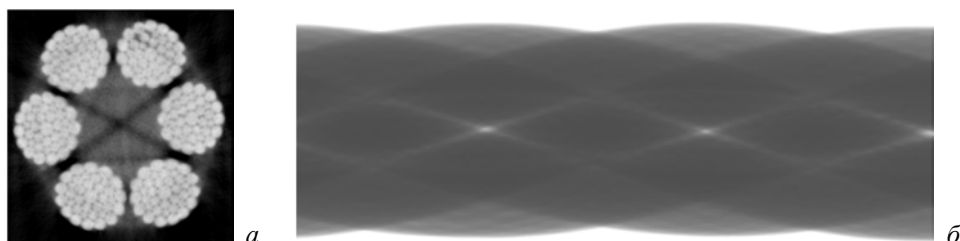


Рис. 3. Результаты радиационных испытаний стального каната:
а – рентгеновская вычислительная томография; *б* – цифровая радиография

Полученные изображения позволяют судить о внутренней структуре каната, и на их основе могут быть обнаружены различные дефекты. Вероятность выявления и правильной идентификации дефектов стальных канатов человеком-оператором может быть существенно повышена при использовании специализированных алгоритмов обработки изображений [16].

2.3. Пенобетон

Пенобетон обладает высокими теплоизоляционными свойствами, меньшей потребностью в цементе, невысокой плотностью и простотой механической обработки, что обуславливает расширение сферы его применения в жилищном и промышленном строительстве [17]. Достоинства и недостатки пенобетонов связаны с их пористостью. Качество пенобетонов зависит не только от средней доли пор в объеме материала, но и от характера распределения пор по размерам, а также однородности указанных показателей. Традиционным способом исследования структуры пенобетонов является метод последовательного срезания слоев с последующим анализом подготовленной поверхности [17] визуально-измерительным методом или обработкой цифровых фотографических изображений специализированными программами. Основными недостатками указанного выше способа является низкая производительность, образование облака пылевидных частиц, искажение структуры среза испытуемых образцов механическим воздействием на материал. Альтернативой является применение метода РВТ, с помощью которого может быть оценена структура образцов пенобетона [18].

Для оценки степени однородности пенобетона по пористости на установке ЦР и РВТ Томского политехнического университета были получены трехмерные изображения внутренней структуры трех образцов размером $100 \times 100 \times 100$ мм³ из неавтоклавного конструкционно-теплоизоляционного пенобетона плотностью 650 кг/м³. Первый образец пенобетона – контрольный без добавок, второй – с заменой 20 % цемента золой-уносом ТЭЦ-5 г. Новосибирска, третий – с термомодифицирующей торфяной добавкой ТМТ-600 [18].

Размер вокселя составил 74,5 мкм для первого образца и 76,8 мкм для двух оставшихся. На рис. 4. приведены типичные изображения слоев для трех образцов пенобетона. На изображениях темные фрагменты соответствуют порам, а светлые уплотнениям.

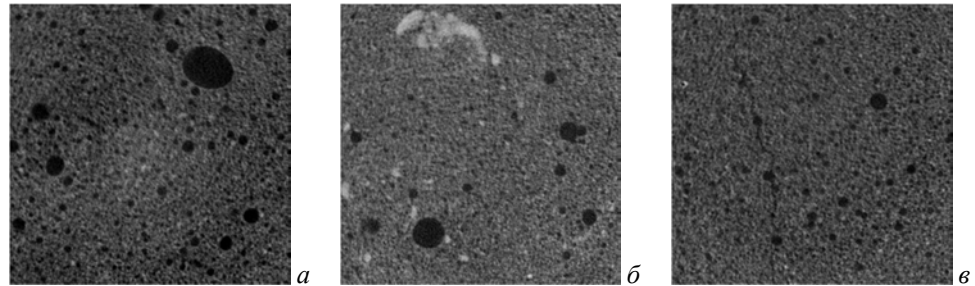


Рис. 4. Типичные изображения слоев, полученные методом РВТ:
а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3

На изображениях первого образца (рис. 4, а) явно выделяются эллипсоидальная пора размером около 9 мм и группа сферических пор размерами от 1 до 2 мм, основная часть пор имеет размеры менее 1 мм, характерный размер уплотнений неправильной формы не превышает 0,2 мм.

На изображениях второго образца (рис. 4, б) обнаруживаются несколько пор сферической формы размером от 1 до 5,6 мм. Основная часть пор имеет размеры, сопоставимые с размерами вокселя – 76,8 мкм. На изображениях заметны две сферические поры, касающиеся друг друга. Выделяются несколько уплотнений неправильной формы размерами от 1 до 2 мм и группа соприкасающихся крупных уплотнений неправильной формы, занимающая область протяженностью около 20 мм.

Третий образец отличается высокой однородностью и по пористости, и по уплотнениям. Обнаружена пространственная достаточно гладкая трещина, проходящая через весь образец и соединяющая группу пор размером около 1 мм. Раскрытие трещины около 76,8 мкм. Визуально она не выявляется.

Анализ пространственной структуры образцов из пенобетона, оцененной с помощью РВТ, свидетельствует в пользу эффективности метода для определения степени неоднородности пенобетона по пористости и уплотнениям и обнаружения дефектов. Метод РВТ, безусловно, может быть полезен на стадии отработки технологии изготовления пенобетона.

Заключение

В статье рассмотрен ряд задач, характерных для строительства и строительного материаловедения, которые решаются методами цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии. Проиллюстрированы примеры применения цифровой радиографии для контроля стальных канатов и механических соединений арматуры с использованием обжимных муфт. Представлены результаты экспериментальной оценки внутренней структуры пенобетона и стальных канатов методом рентгеновской вычислительной томографии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *McCann, D.M.* Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures / D.M. McCann, M.C. Forde // *NDT & E International*. – 2001. – V. 34. – № 2. – P. 71–84.
2. *Nedavnii, O.I.* Assessing the condition of reinforcement in concrete using the gamma-absorption method / O.I. Nedavnii, S.P. Osipov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2000. – V. 36. – № 7. – P. 520–525.
3. *Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking using non-destructive x-ray attenuation measurements* / A. Michel, B.J. Peas, M.R. Geiker, H. Stang, J.F. Olesen // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – V. 41. – № 11. – P. 1085–1094.
4. *Owen, R.D.B.* Portable linear accelerators for X-ray and electron-beam applications in civil engineering / R.D.B. Owen // *NDT & E International*. – 1998. – V. 31. – № 6. – P. 401–409.
5. *Wang, L.B.* Quantification of damage parameters using X-ray tomography images / L.B. Wang, J.D. Frost, G.Z. Voyiadjis, T.P. Harman // *Mechanics of Materials*. – 2003. – V. 35. – № 8. – P. 777–790.
6. *Withers, P.J.* Fatigue and damage in structural materials studied by X-ray tomography / P.J. Withers, M. Preuss // *Annual Review of Materials Research*. – 2012. – V. 42. – P. 81–103.
7. *Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики, неразрушающего контроля и инспекции* / В.А. Клименов, Ю.В. Алхимов, А.М. Штейн, С.В. Касьянов, С.А. Бабилов, А.В. Батрагин, С.П. Осипов // *Контроль. Диагностика*. – 2013. – № 13. – С. 31–42.
8. *Москалев, В.А.* Бетатроны / В.А. Москалев, В.Л. Чахлов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 267 с.

9. *Small-size betatrons for radiographic inspection* / M. Stein, V.A. Kasyanov, V.L. Chakhlov, J. Macleod, P. Marjoribanks, S. Hubbard // *Proceedings of 16th World Conference on Non Destructive Testing, Radiography*, Montreal, Canada. – 2004. – 8 p.
10. *Industrial radiology* / U. Ewert, G.R. Jaenisch, U. Zscherpel, K. Osterloh, B. Redmer // *Handbook of Technical Diagnostics*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. – P. 221–247.
11. Капустин, В.И. О критериях сравнения различных модификаций методов цифровой радиографии / В.И. Капустин, С.П. Осипов // *Контроль. Диагностика*. – 2013. – № 12. – С. 25–32.
12. *Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images* / R. Peng, Y. Yang, Y. Ju, L. Mao, Y. Yang // *Chinese Science Bulletin*. – 2011. – V. 56. – № 31. – P. 3346–3357.
13. *Щелевые и пинхольные коллиматоры в цифровой рентгенографии* / О.А. Сидуленко, В.А. Касьянов, С.В. Касьянов, С.П. Осипов // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2007. – № 3 – С. 62–64.
14. *Многоканальный радиометрический комплекс для дефектоскопии промышленных изделий и строительных материалов* / О.И. Недавний, Б.В. Максименко, В.Д. Коваль, С.П. Осипов // *Известия вузов. Строительство*. – 1994. – № 12. – С. 96–99.
15. *Hsieh, J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances* / J. Hsieh. – Bellingham, WA: SPIE, 2009. – 556 p.
16. *Идентификация дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям* / С.П. Осипов, А.В. Батранин, В.С. Воронова, А.В. Шиндина // *Технологии технической безопасности (Интернет-журнал)*. – 2013. – № 5. – 10 с.
17. *Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives* / A.I. Kudyakov, Ju. Sarkisov, N.O. Kopanitsa, A.V. Kasatkina, I.A. Prischepa // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2015. – V. 71. – № 1 (012012). – 7 p.
18. *Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete* / S. Wei, C. Yiqiang, Z. Yunsheng, M.R. Jones // *Construction and Building Materials*. – 2013. – V. 47. – P. 1278–1291.
19. Пат. 2514069 Российская Федерация, МПК (2006.01) С04В38/10. Сырьевая смесь для приготовления пенобетона / Прищепа И.А., Кудяков А.И., Копаница Н.О., Попов И.И., Иванова А.Б. – № 2012150707/03. – Заявл. 26.11.2012 ; опубл. 27.04.2014, № 12.

REFERENCES

1. *McCann D.M., Forde M.C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT & E International*. 2001. V. 34. No 2. P. 71–84.
2. *Nedavniy O.I., Osipov S.P. Assessing the condition of reinforcement in concrete using the gamma-absorption method. Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2000. V. 36. No. 7. Pp. 520–525.
3. *Michel A., Peas B.J., Geiker M.R., Stang H., Olesen J.F. Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking using non-destructive X-ray attenuation measurements. Cement and Concrete Research*. 2011. V. 41. No. 11. Pp. 1085–1094.
4. *Owen R.D.B. Portable linear accelerators for X-ray and electron-beam applications in civil engineering. NDT & E International*. 1998. V. 31. No. 6. Pp. 401–409.
5. *Wang L.B., Frost J.D., Voyiadjis G.Z., Harman T.P. Quantification of damage parameters using X-ray tomography images. Mechanics of Materials*. 2003. V. 35. No. 8. Pp. 777–790.
6. *Withers P.J., Preuss M. Fatigue and damage in structural materials studied by X-ray tomography. Annual Review of Materials Research*, 2012. V. 42. Pp. 81–103.
7. *Klimenov V.A., Alhimov Yu.V., Shtein A.M., Kasianov S.V., Babikov S.A., Batranin A.V., Osipov S.P. Primenenie i razvitie metodov cifrovoy radiografii dlya tehnicheckoy diagnostiki, nerazrushayushchego kontrolya i inspekcii [Application and development of digital radiography for technical diagnostics, non-destructive testing and inspection]. Kontrol'. Diagnostika ("Testing. Diagnostics")*. 2013. No. 13. Pp. 31–42. (rus)
8. *Moskalev V.A., Chakhlov V.L. Betatrony. [Betatrons]. Tomsk : TPU Publ., 2009. 267 p. (rus)*
9. *Stein M., Kasyanov V.A., Chakhlov V.L., Macleod J., Marjoribanks P., Hubbard S. Small-size betatrons for radiographic inspection. Proc.16th World Conf. on Non Destructive Testing, Radiography*. Montreal, Canada, 2004. 8 p.

10. Ewert U., Jaenisch G.R., Zscherpel U., Osterloh K., Redmer B. Industrial radiology. Handbook of Technical Diagnostics. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. Pp. 221–247.
11. Kapustin V.I., Osipov S.P. O kriteriyah sravneniya razlichnyh modifikatsiy metodov cifrovoy radiografii [Criteria for comparing different modifications of digital radiography methods]. *Kontrol'. Diagnostika ('Testing. Diagnostics')*. 2013. No. 12. Pp. 25–32. (rus)
12. Peng R., Yang Y., Ju Y., Mao L., Yang Y. Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images. *Chinese Science Bulletin*. 2011. V. 56. No. 31. Pp. 3346–3357.
13. Sidulenko O.A., Kasianov V.A., Kasianov S.V., Osipov S.P. Schelevye i pinhol'nye kollimatory v cifrovoy rentgenografii [Slot and pinhole collimators in digital radiography]. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2007. No. 3. Pp. 62–64. (rus)
14. Nedavniy O.I., Maksimenko B.V., Koval' V.D., Osipov S.P. Mnogokanal'niy radiometricheskii kompleks dlya defektoskopii promyshlennykh izdeliy i stroitel'nykh materialov [Multi-channel radiometric system for flow detecting industrial products and construction materials]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 1994. No. 12. Pp. 96–99. (rus)
15. Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA : SPIE, 2009. 556 p.
16. Osipov S.P., Batranin A.V., Voronova V.S., Shindina A.V. Identifikatsiya defektov stal'nykh kanatov po cifrovym radiograficheskim izobrazheniyam [Identification of defects of steel ropes using digital radiographic images]. *Tehnologii tehnosfernoy bezopasnosti*. 2013. No. 5. 10 p. (rus)
17. Kudyakov A.I., Sarkisov Ju., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prischepa I.A. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2015. V. 71. No. 1. 7 p.
18. Wei S., Yiqiang C., Yunsheng Z., Jones M.R. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. V. 47. Pp. 1278–1291.
19. Prischepa I.A., Kudyakov A.I., Kopanitsa N.O., Popov I.I., Ivanova A.B. Syrievaya smes' dlya prigotovleniya penobetona [Raw material mixture for foam concrete]. Pat. Rus. Fed. N 2514069. 2012.