*С.П. Осипов<sup>1</sup>, А.В. Батранин<sup>2</sup>, В.С. Воронова<sup>1</sup>, А.В. Шиндина<sup>1</sup>* (<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, <sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет; e-mail: osip1809@rambler.ru)

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ПО ЦИФРОВЫМ РАДИОГРАФИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Предложена схема комплекса цифровой радиографии для контроля стальных канатов. Приведены критерии идентификации основных типов дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям. Результаты исследований позволят повысить безопасность и надежность применения стальных канатов в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: стальной канат, цифровые радиографические изображения, дефекты, критерии идентификации.

# S.P. Osipov, A.V. Batranin, V.S. Voronova, A.V. Shindina IDENTIFICATION OF DEFECTS OF STEEL ROPES ON THE DIGITAL RADIOGRAPHIC IMAGES

Scheme for complex digital radiography of steel ropes offered. The criteria for the identification of major types of defects steel ropes of digital radiographic images are shown. The research results will improve the safety and reliability of the use of wire ropes in various industries.

Key words: steel ropes, digital radiography images, defects, criteria for identification.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 15 мая 2013 г.

Стальные канаты широко используются в различных отраслях народного хозяйства, прежде всего, на подъёмных сооружениях. Надёжность и безопасность эксплуатации таких подъёмных сооружений определяется, не в последнюю очередь, техническим состоянием используемых канатов [1-3]. Вопросы, связанные с контролем и браковкой стальных канатов, нормируются соответствующими документами различных стран, в том числе в России [4]. Стальные канаты отличаются разнообразием конструкций.

В процессе изготовления, хранения и эксплуатации в стальных канатах появляются различные дефекты. Для обнаружения дефектов применяют магнитную, ультразвуковую и рентгеновскую дефектоскопию. Каждый из указанных методов дефектоскопии имеет свои области применения.

Рентгеновская дефектоскопия является наиболее универсальным методом поиска дефектов, она позволяет обнаружить практически все типы дефектов в стальных канатах различной конструкции, различного диаметра. Одной из реализаций рентгеновской дефектоскопии является цифровая сканирующая радиография. В литературе не в полной мере отражены вопросы, связанные с оценкой возможности идентификации дефектов стальных канатов по радиографическим изображениям. Под идентификацией дефектов будем понимать отнесение выявленного дефекта к одному из наиболее распространённых типов дефектов стальных канатов.

В анализируемом нами случае *объектом контроля (ОК)* является стальной канат. Остановимся на формировании цифрового теневого радиографического изображения стального каната. На рис. 1 приведена схема цифрового радиометрического комплекса для контроля стальных канатов.



**Рис. 1.** Схема цифрового радиометрического комплекса для контроля стальных канатов

Стальной канат 1 сканируется узким щелевым (коллимированным) пучком гамма или рентгеновского излучения 2 (далее фотонного излучения). Излучение, прошедшее сквозь канат, регистрируется линейкой радиометриических детекторов 3. Для уменьшения вклада рассеяния применяются щелевые коллиматоры источника фотонного излучения 4 и линейки радиометрических детекторов 5.

В радиометрических детекторах поглощенная за время  $\Delta t$  энергия фотонного излучения трансформируется в электрический сигнал, который затем преобразуется с помощью *аналого-цифрового преобразователя (АЦП)* 6 в цифровой сигнал. Полученный цифровой сигнал является отдельным элементом формируемого цифрового радиографического изображения. За интервал времени длительностью Δ*t* формируется вся строка изображения. Далее цифровые сигналы поступают в компьютер 7. Затем возможны два варианта дальнейшего преобразования цифровой информации.

В первом варианте цифровое радиографическое изображение преобразуется в бегущее полутоновое радиографическое изображение, отображаемое на видеоконтрольном устройстве 8 и анализируемое оператором. Во втором варианте цифровое радиографическое изображение подвергается различным цифровым преобразованиям, целью которых является повышение вероятности обнаружения дефектов, установление степени отклонений (допустимое отклонение или дефект) различных параметров стального каната.

Возможны два подхода к реализации сканирования: первый – перемещение системы (источник фотонного излучения – линейка радиометрических детекторов) относительно объекта контроля; второй – перемещение объекта относительно системы (источник фотонного излучения – линейка радиометрических детекторов). Для анализируемого нами ОК – стального каната – более предпочтительным является второй подход. Разумеется, сканирование должно осуществляться непрерывно, так как любая реализация дискретного сканирования приводит либо к дополнительным искажениям формируемого цифрового радиографического изображения, либо к уменьшению производительности контроля. Для справедливости отметим, что и непрерывное сканирование имеет тоже свой недостаток, заключающийся в продольном искажении изображения, величина которого связана с интервалом измерения  $\Delta t$ .

Выше мы подчеркнули, что сканирование стального каната обеспечивается его равномерным перемещением относительно системы: источник фотонного излучения – линейка радиометрических детекторов. Перемещение каната может осуществляться штатной системой, состоящей из ведущего барабана 9 и ведомого барабана 10. Флуктуации расстояния от источника фотонного излучения до каната уменьшаются протягиванием стального каната между двумя парами взаимно связанных роликов 11. Расстояния между роликами могут изменяться, что необходимо для увеличения номенклатуры контролируемых стальных канатов.

Вся система цифровой радиографии (без ведущего и ведомого барабанов) конструктивно оформляется в едином корпусе 12, необходимом, в том числе, и для обеспечения радиационной безопасности. Блок оператора 13 изготавливается в виде единого модуля, включающего в себя компьютер и видеоконтрольное устройство, и размещается на расстоянии, безопасном для персонала. Для обеспечения радиационной безопасности система цифрового радиографического контроля должна быть оснащена несколькими дозиметрами 14, световой 15 и звуковой 16 индикацией. Все оборудование должно управляться с блока оператора.

Замечание. Отметим, что имеется несколько важных особенностей стальных канатов, как объектов цифрового радиографического контроля. Все эти особенности связаны с тем, что основные параметры поперечного сечения конкретного каната в пределах нормативных требований не зависят от местоположения сечения. К упомянутым параметрам относятся форма сечения, площадь поперечного сечения, суммарная площадь сечений стальных проволочек.

Для того, чтобы оценить возможность идентификации дефектов стальных канатов по радиографическим изображениям, необходимо максимально упростить геометрическую форму ОК. В качестве модели стального каната будем использовать протяжённый однородный цилиндр.

Целью проведённых авторами исследований является теоретическое обоснование возможности идентификации дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям, поэтому на первом этапе сделаем ряд допущений, существенно облегчающих решение поставленной задачи. Указанные допущения относятся к источнику фотонного излучения и радиометрическим детекторам: источник фотонного излучения является плоским мононаправленными моноэнергетическим; точечные радиометрические детекторы – детекторы полного поглощения. В рассматриваемом случае линейка детекторов совпадает с линией. В этих допущениях исходное радиографическое изображение  $I = \{I(x, y); (x, y) \in S\}$  представляет распределение суммарной энергии фотонов, прошедших без ослабления через объект контроля и зарегистрированных детекторами. Здесь ось *OX* совпадает со строкой изображения (линейкой детекторов), а ось *OY* – с направление сканирования (с осью каната). Логично принять в качестве множества *S* прямоугольник размерами  $a \times b$ , заметим, что для рассматриваемого нами случая  $a \ll b$ .

Выражение для описания теневого радиографического изображения стального каната имеет следующий вид:

$$I(x, y) = N_0 \Delta t E e^{-\int_{-\int_{-}^{h(x,y)} \mu(E,h(x,y)) dh(x,y)}}, (x, y) \in S,$$
(1)

где  $N_0$  – число фотонов, излучаемых точкой источника излучения в единицу времени;

 $\Delta t$  – время измерения;

 $\mu(E, h(x, y))$  – распределение линейного коэффициента поглощения фотонного излучения с энергией *E* по толщине каната h(x, y) по лучу, соединяющему точку детектирования с координатами (x, y) с соответствующей излучающей точкой. Назовем величину I(x, y) радиометрическим сигналом (исходным сигналом) в элементе изображения с координатами (x, y). Далее исходный сигнал в каждой точке изображения оцифровывается, в первом приближении будем также считать, что длина интервала дискретизации  $\Delta I$  пренебрежимо мала.

На втором этапе исходное изображение  $I = \{I(x, y); (x, y) \in S\}$  нормируют на  $I_0 = \{I_0(x, y); (x, y) \in S\}$  – изображение без объекта контроля при сохранении геометрических, энергетических и временных параметров системы контроля. Изображение  $I_0$  оцифровывается с тем же интервалом дискретизации, что и изображение I. Формировать изображение  $I_0$  в полном объёме нет необходимости, достаточно нескольких строк, количество которых подбирается таким образом, чтобы погрешность оценки среднего значения исходного сигнала по столбцу была минимальной. Сигналы с детекторов на стадии калибровочных измерений согласуются друг с другом с использованием дополнительных коэффициентов, с целью получения изображения, с одинаковым уровнем сигналов (с точностью до шумовой составляющей) в изображении, в случае отсутствия объекта контроля. Нормированное изображение логарифмируется, умножается на "-1", в результате получаем P – конечное цифровое радиографическое изображение. Выражение для описания преобразований, осуществляемых на втором этапе, имеет вид:

$$P = \{P(x, y) = -\ln[I(x, y)/\Delta I] + \ln[I_0(x)/\Delta I], (x, y) \in S\},$$
(2)

где [z] – целая часть числа z.

Из совместного анализа выражений (1) и (2) можно сделать вывод о том, что изображение P представляет собой распределение степени ослабления фотонного излучения по поверхности S

$$P = \left\{ P(x, y) \approx \int_{0}^{h(x, y)} \mu(E, h(x, y)) dh(x, y), (x, y) \in S \right\}.$$
 (3)

Для повышения вероятности выявления разнообразных дефектов стальных канатов логично предложить использование дополнительных радиографиизображений \_ изображений эталонных канатов. Радиограческих фическое изображение эталонного каната Р<sub>0</sub> формируется в тех же условиях, что и испытуемого каната. Исходные цифровые радиографические изображения  $P_0$  и *P* трансформируются в результирующее изображение  $Q = P_0 - P$ ,  $Q = \{P_0(x, y) - P(x, y); (x, y) \in S\}$ . Полученное результирующее изображение *Q* представляет собой, по сути дела, теневое изображение дефекта. Здесь понятие "дефект" трактуется в широком понимании этого термина, как каждое отдельное несоответствие объекта испытаний нормативно-технической документации.

Необходимо оценить возможность идентификации различных дефектов по исходному радиографическому изображению P и изображению Q, то есть формирования некоторых критериев, по которым можно отнести обнаруженный дефект к тому или иному классу дефектов.

Рассмотрим основные типы дефектов стальных канатов и проанализируем, как они проявляются на радиографическом изображении *P* и изображении *Q*, а также приведём возможные рекомендации по обработке изображений.

Радиографические изображения подвергаются анализу построчно, то есть для фиксированного значения y анализируется функция  $Q_y(x) = Q(x, y); 0 \le x \le a$ , где a – размер радиографического изображения в направлении, перпендикулярном направлению сканирования.

# Дефект – обрыв проволочек

Обрыв внешних проволочек легко диагностируется визуальным способом. Будем рассматривать обрыв внутренних проволочек. Оборванные части проволочек расходятся, в результате чего внутри каната формируется локальное включение типа поры, проявляющееся на исходном цифровом радиографическом изображении P в виде локального светлого пятна, на изображении Q оно будет тёмным и более контрастным. Изображение отдельного дефекта рассматриваемого типа можно характеризовать формой и проекцией дефекта на плоскость изображения –  $S_D \subset S$  и  $Q_y(x)$  – распределением лучевой толщины дефекта по множеству  $S_D$ . Очевидно, что в результате совместного анализа распределения  $Q_y(x)$  и проекций дефектов на плоскость изображения  $S_D$  можно сделать вывод о том, сколько проволочек оборвалось.

На рис. 2 приведена функция  $Q_y(x)$  для следующих условий: диаметр стального каната  $d_0 = 20$  мм; энергия гамма-излучения – 150 кэВ; диаметр одной проволочки – 1 мм; обрыв единичной проволочки.



**Рис. 2.** Зависимости *P<sub>y</sub>*(*x*) и *Q<sub>y</sub>*(*x*) для дефекта – обрыв единичной проволочки: д.с.п. – длина свободного пробега гамма или рентгеновского излучения

Если обрыва проволочки нет, то при малом уровне шумов в исходных радиографических изображениях выполняется соотношение  $Q_{\nu}(x) \approx 0$ .

# Дефект – равномерный износ каната

В этом случае исходное цифровое радиографическое изображение каната P будет более светлым, чем изображение эталона  $P_0$ , причём размер изображения изношенного каната будет меньше размера изображения эталонного каната. На изображении анализируемый дефект Q будет ограничен по краям более тёмными полосами.

На рис. 3 приведена типичная функция  $Q_y(x)$  для тех же условий, что в предыдущем примере, величина износа – 0,5 *мм*.



**Рис. 3.** Зависимости  $P_{y0}(x)$ ,  $P_y(x)$  и  $Q_y(x)$  для дефекта – равномерный износ каната

Отличие заключается в виде дефекта – поверхностный износ на 0,5 *мм* по всей окружности идеализированной модели каната. Отметим, что на практике может наблюдаться и неравномерный износ, например, только с одной стороны каната. Износ можно характеризовать линейным размером, а также массой. Массовый износ *M* оценивается с помощью выражения:

$$M = \int_{0}^{b} Q(x) \mathrm{d}x$$

#### Дефект – сплющивание каната

Будем рассматривать один из наиболее часто встречающихся видов сплющивания, которое вызывается направленными друг к другу плоскими воздействиями. Идентифицировать такой дефект в результате анализа радиографических снимков достаточно сложно, так как проявление исследуемого дефекта зависит от ориентации сплющивания относительно плоскости радиографического изображения. Возможны два предельных случая. В первом из них линия, параллельная направлению физического воздействия на канат, совпадает с направлением просвечивания, а во втором – параллельна строке радиографического изображения. Условно назовем первый случай горизонтальным сплющиванием, а второй – вертикальным сплющиванием. Для первого случая размер изображения каната *P* в исходном радиографическом изображении будет больше, чем для бездефектного каната, а для второго – меньше. Максимальное значение функции P(x) для первого случае будет меньше, чем максимальное значение для аналогичной функции для бездефектного каната  $P_0(x)$ . Для второго же случая максимальное значение функции P(x) будет больше. чем максимальное значение для аналогичной функции для бездефектного каната  $P_0(x)$ . Следует отметить, что в пользу сплющивания будет свидетельствовать приближённое равенство

$$\int_{0}^{b} P(x) dx \approx \int_{0}^{b} P_{0}(x) dx.$$
(5)

На рис. 4 приведён внешний вид функции Q(x) для горизонтального сплющивания каната. Вертикальный размер каната уменьшился на 20 %.



**Рис. 4.** Зависимости  $P_{y0}(x)$ ,  $P_y(x)$  и  $Q_y(x)$  для дефекта – расплющивание каната

Дефект будет идентифицироваться по изображению *Q* как сплющивание, если выполняется условие:

$$\int_{0}^{b} Q(x) \mathrm{d}x \approx 0 \,. \tag{6}$$

Выполнение одного из условий (5) или (6) будет свидетельствовать в пользу и более сложных видов сплющивания.

# Дефект – местное увеличение диаметра каната

Указанный дефект легко обнаруживается визуальными методами. Он легко обнаруживается и в результате анализа радиографических изображений. Проявлением такого дефекта на изображении *Р* является увеличение линейного размера изображения каната – *d*.

На рис. 5 приведена зависимость Q(x) при разбухании каната. Диаметр каната увеличился в 1,1 раза.



**Рис. 5.** Зависимости  $P_{y0}(x)$ ,  $P_y(x)$  и  $Q_y(x)$  для дефекта – разбухание каната

В результате анализа изображения *Q* можно сделать вывод о наличии в канате дефекта типа "разбухание", если одновременно выполняются соотношения (7):

$$d > d_0, \quad \int_a^b Q(x) \mathrm{d}x \approx 0.$$
 (7)

Дополнительное свидетельство в пользу "разбухания" может быть получено с помощью электрического измерителя диаметра каната, устанавливаемого на одну из пар роликов 11 (рис. 1).

## Дефект – коррозия металла

Коррозия внешних проволочек выявляется визуально. Но степень коррозионного поражения визуальными методами обнаружить затруднительно. Возможность выявления коррозии внутренних проволочек или сердечника в результате анализа радиографического изображения P обуславливается тем, что плотность окислов и солей железа существенно меньше плотности железа. Для простоты рассмотрим коррозию центральной части каната. Увеличение объёма центральной части приводит к увеличению объема каната в целом. Центральная часть каната на радиографическом изображении P будет более светлой, чем на изображении  $P_0$ .

На рис. 6. приведены зависимости  $P_y(x)$  и  $Q_y(x)$  для коррозии (Fe(OH)<sub>3</sub>) центральной части стального каната. Область, поражённая коррозией, имеет диаметр 8 *мм*.



**Рис. 6.** Зависимости  $P_{y0}(x)$ ,  $P_y(x)$  и  $Q_y(x)$  для дефекта – коррозия центральной части

Отметим, что применение двухэнергетической радиографии (метода дуальных энергий) применительно к контролю стальных канатов [5], позволит существенно повысить достоверность идентификации коррозионных дефектов канатов.

Каждый из указанных выше дефектов стальных канатов по-разному проявляется на цифровых радиографических изображениях P и Q. В некоторых случаях трудно идентифицировать дефекты по их визуальным проявлениям на анализируемых изображениях. В этих случаях необходим анализ цифровых изображений с использованием выражений (1)-(7).

### Выводы

Приведённые выше критерии позволяют идентифицировать типы дефектов стальных канатов по исходному и результирующему цифровым радиографическим изображениям, что послужит обеспечению безопасной эксплуатации подъемных машин и оборудования.

### Литература

1. *Jin Y.C., Wang R., Lu Y.Z.* Steel Channel Lifting Using Tubular Gin Pole-Assisted, Multi-Point, High-Position Whole Lifting Technology // Applied Mechanics and Materials, 2012. V. 170. C. 3153 – 3158.

2. *Chaplin C.R.* Interactive fatigue in wire rope applications // Symposium on Mechanics of Slender Structures (MoSS 2008), 2008.

3. *Yamei H.* Reliability Assessment of Crane Operations // SIGNATURE, 2007. V. 2007. C. 11-20.

4. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки. РД РОСЭК 012-97. 49 с.

5. *Осипов С.П., Темник А.К., Воронова В.С.* Неразрушающий контроль стальных канатов методом дуальных энергий // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. Вып.4 (44). 6.08.2012. 10 с. http://ipb.mos.ru/ttb.