

УДК 620.179.147
DOI: 10.14489/td.2019.04.pp.020-027

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СТРЕНДОВЫХ КАНАТОВ БОЛЬШИХ ДИАМЕТРОВ



А. В. Семенов,
ООО «ИНТРОН ПЛЮС»,
Москва, Россия.
E-mail: asemenov@intron.ru



Д. А. Слесарев,
д-р техн. наук,
ООО «ИНТРОН ПЛЮС»,
Москва, Россия.
E-mail: dslesarev@intron.ru



Рассмотрена актуальная проблема дефектоскопии стрендовых канатов большого диаметра. Приведена структура используемых в современных вантовых мостах и других объектах стрендовых канатов. Дано обоснование необходимости дефектоскопии и описание типов дефектов, которые требуется выявлять. Описан разработанный вихретоковый дефектоскоп. Представлены результаты испытаний как в лабораторных условиях, так и при контроле реальных объектов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, вихретоковый контроль, стрендовые канаты.

A. V. Semenov, D. A. Slesarev (INTRON PLUS, Ltd, Moscow, Russia)

NONDESTRUCTIVE TESTING OF LARGE DIAMETER MULTISTRAND STAY CABLES

The article is devoted to non-destructive testing of large diameter multistrand stay cables. Structure of multistrand stay cables used in modern cable-stayed bridges and other objects is considered in this article. Potential defects are considered and the importance of stay cables testing is proven. Because of huge mass and very strong magnetic strength application of traditional MRT instruments is practically impossible. The proposed method is based on eddy currents, appropriate device was developed. The results of it test both in laboratory conditions and during inspection of two different bridges are given.

Keywords: nondestructive testing, eddy current testing, multistrand stay cables, parallel strand system.

Статья поступила в редакцию 04.02.2019

Received 04.02.2019

Стальные канаты широко используются для решения разных технических задач более 150 лет [1]. При этом во многих случаях стальные канаты применяются в ответственных системах, где аварийная ситуация может быть сопряжена с большими материальными потерями и потенциальными человеческими жертвами. В этой связи задача эффективного и достоверного контроля технического состояния стальных канатов остается актуальной на протяжении уже длительного времени.

В последние десятилетия получили значительное распространение, в частности в области строительства вантовых мостов, так называемые мультистрендовые канаты, которые состоят из параллельных стрендов, заключенных во внешнюю оболочку из высокоплотного полиэтилена или стали. Стрендом называется специальный высокопрочный канат, как правило, из семи проволок, в свою очередь защищенный полиэтиленовым покрытием. При этом диаметр мультистрендового каната может быть от 120 до 290 мм, но стандартные средства неразрушающего контроля канатов – магнитные дефектоскопы позволяют контролировать канаты диаметром лишь до 175 мм. Строение ванты, выполненной на основе мультистрендового каната, показано на рис. 1. Стренды проходят внутри оболочки, которая предохраняет их от вредных воздействий окружающей среды [2, 3].

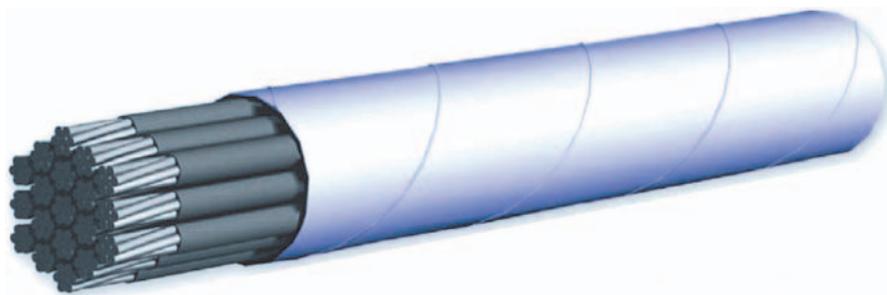


Рис. 1. Строение мультистрендового каната



Рис. 2. Мост на о. Русский в г. Владивосток

Общее число стрендов может достигать 169, однако чаще всего на реальных объектах встречаются ванты с числом стрендов не более 100. Наиболее масштабными и известными объектами, в конструкции которых используются ванты на основе стрендов в России, являются «Живописный» мост в г. Москве, мост на о. Русский в г. Владивостоке (рис. 2), мост через бухту Золотой Рог в г. Владивостоке, вантовый мост через Корабельный фарватер в г. Санкт-Петербург, Большой Обуховский мост в г. Санкт-Петербурге.

Несмотря на широкое использование технологии мультистрендовых вантовых канатов, на данный момент Ростехнадзором не регламентируются необходимость инструментального контроля и критерии браковки таких канатов. Для вантовых мостов существуют лишь рекомендации (п. А20 [4]) о том, что следует уделять внимание состоянию вант и узлов их крепления. Таким образом, с учетом ответственности такого элемента, как ванта, актуальной представляется задача разработки технологии контроля ванты по всей длине.

Для стальных канатов, используемых на подъемно-транспортных сооружениях, оценка состояния каната выполняется на основании таких основных критериев браковки, как величина потери сечения каната по металлу и количество оборванных проволок на заданной длине каната [5, 6]. Опыт контроля

вант традиционной конструкции на многих мостах показывает, что вантовый канат подвержен возникновению дефектов различной природы: коррозии, обуславливающей потерю сечения по металлу, и обрывам отдельных проволок.

Однако учитывая описанное число степеней защиты современных мультистрендовых вантовых систем от развития коррозии, наиболее вероятным дефектом следует считать обрывы отдельных проволок. С учетом того что ванты содержат до 165 стрендов, достоверное обнаружение обрыва одного стренда можно считать приемлемым с точки зрения обнаружения потери несущей способности. Расчеты показывают, что в связи с большой длиной стрендов в вантах (обычно сотни метров) и тем, что стренды не связаны друг с другом, обрыв стренда приведет к значительному расхождению оборванных концов. Поэтому в реальных условиях, вероятно, достаточно обнаруживать конец оборванного стренда.

В соответствии с РД [7] для неразрушающего контроля стального каната возможно применение магнитного метода [8] как на основе переменного магнитного поля, так и на основе постоянного магнитного поля. Причем метод переменного магнитного поля используют, как правило, только для измерения потери площади металлического сечения канатов. Таким образом, в случае необходимости обнаружения локальных дефектов фактически предпо-

лагается магнитный метод неразрушающего контроля с использованием постоянного магнитного поля.

Дефектоскоп, реализующий магнитный метод неразрушающего контроля, как правило, включает в себя устройство намагничивания, предназначенное для создания магнитного поля в ОК, и измерительную систему для измерения результата взаимодействия магнитного поля и ОК. С увеличением диаметра каната растет и масса дефектоскопа вследствие увеличения размеров магнитов и магнитопроводов.

В качестве примера можно сравнить массы магнитных головок (магнитная головка предназначена для намагничивания каната и измерения поля рассеяния, далее МГ) МГ 6-26 и МГ 100-175 дефектоскопа «ИНТРОС» [9, 10], выпускаемого ООО «ИНТРОН ПЛЮС». МГ 6-26 предназначена для контроля стальных канатов диаметром от 6 до 26 мм, масса 4 кг. МГ 100-175 предназначена для контроля стальных канатов диаметром от 100 до 175 мм, масса 250 кг. При этом максимальная сила притяжения МГ175 дефектоскопа «ИНТРОС» к канату составляет порядка 7000 Н.

Диаметры мультистрендовых канатов достигают, а в редких случаях и превышают 300 мм. Масса дефектоскопа, изготовленного по традиционной технологии, способного намагнитить такой объект до состояния магнитного насыщения, будет существенно более 250 кг. С учетом большой массы и большой силы притяжения такого дефектоскопа к ванте задача его установки на ванту становится крайне нетривиальной и очень трудоемкой. Дополнительно ситуация усложняется тем, что ввиду конструктивных особенностей вант монтажные работы должны выполняться на высоте. Кроме того, сила притяжения каната к магнитному дефектоскопу и сила тяжести, действующая на МГ, с большой вероятностью приведут к повреждению внешней защитной оболочки ванты.

В качестве альтернативы постоянным магнитам может быть рассмотрено создание поля намагничивания катушкой индуктивности, намотанной на ванту. Масса катушки индуктивности определяется требованиями к величине напряженности магнитного поля в ванте и его однородности, а также допустимой плотностью тока, определяемой сопротивлением провода и эффективностью теплоотвода от катушки индуктивности. Оценочные расчеты показывают, что масса провода катушки индуктивности составит 100...200 кг (в зависимости от требуемой величины и равномерности поля). Кроме того, катушку индуктивности необходимо наматывать и сматывать на каждую ванту, что, безусловно, снижает технологичность проведения контроля. Тем не менее описанная технология магнитного

контроля реализована в дефектоскопе, разработанном Швейцарским исследовательским центром ЕМРА [11]. Дефектоскоп рассчитан на контроль вант диаметром до 180 мм.

Таким образом, несмотря на теоретическую возможность использования магнитного метода неразрушающего контроля, основанного на регистрации магнитных полей рассеяния, практическое его применение для вант диаметром до 300 мм и более является крайне затруднительным. В качестве альтернативы был использован метод, основанный на взаимодействии переменного электромагнитного поля малой (по сравнению с полем, необходимым для магнитного насыщения) величины с объектом. В качестве источника возбуждения была выбрана возбуждающая катушка индуктивности, в качестве приемника сигнала – измерительные катушки индуктивности, отдельные в каждой из двух половинок прибора. В соответствии с ГОСТ [12] этот метод должен быть отнесен к вихретоковому методу неразрушающего контроля.

Как известно, одним из ключевых недостатков вихретокового метода в применении к контролю ферромагнитных объектов является помеха, вызванная неравномерностью магнитных свойств ферромагнитного материала. Эта помеха не изменяется при повторении операций контроля и с этой точки зрения является наиболее трудной для подавления [13]. В то же время обратимая магнитная проницаемость может меняться в значительных пределах при изменении намагниченности материала [14], которая зависит не только от внешнего намагничивающего поля, но и от предыстории намагничивания материала.

Таким образом, ключевой задачей, которую должен решать дефектоскоп, является обнаружение обрывов как внешних, так и внутренних стрендов на фоне помех от неинформативных влияющих факторов (неравномерность магнитных свойств, неравномерность геометрии пучка стрендов и т.д.). При этом дефектоскоп должен иметь небольшую массу и обеспечивать удобство монтажа, а также возможность работы от компактных аккумуляторов в течение длительного времени. Вихретоковый дефектоскоп обеспечивает выполнение этих требований. Он состоит из измерительной головки (МГ) и электронного блока (ЭБ), соединенных кабелем.

При разработке дефектоскопа использовалась масштабная модель объекта контроля, представляющая собой сборку стальных проволок диаметром 5 мм, на которые была надета изоляция из диэлектрического неферромагнитного материала. Один пруток соответствовал одному стренду. Прутки были уложены параллельно друг другу таким обра-

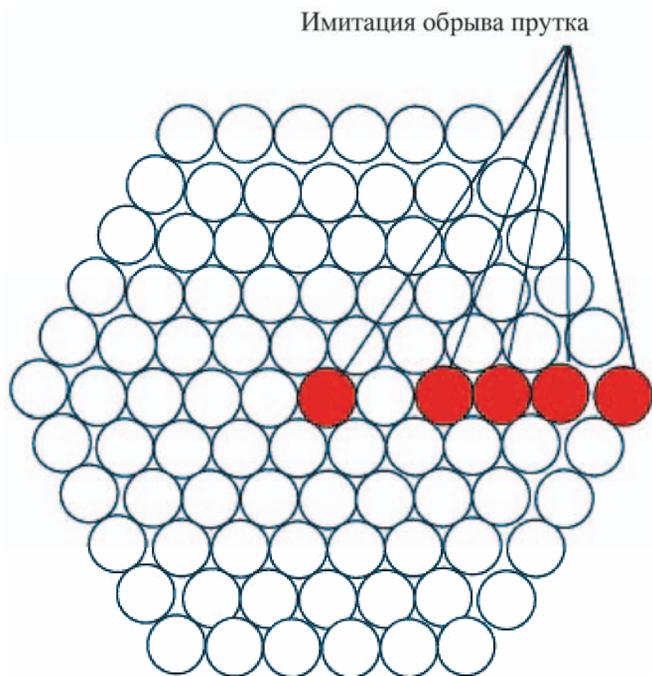


Рис. 3. Положение имитации обрыва прутка

зом, что поперечное сечение в любом месте сборки по форме было близко к шестиграннику. Число прутков в сборке изменялось от 19 (3 слоя) до 91 (6 слоев). Во всех слоях, за исключением второго, были реализованы имитаторы локальных дефектов в виде обрыва одного прутка (рис. 3). Расстояние между концами прутка соответствовало трем диаметрам прутка, что для реального стренда эквивалентно обрыву с расхождением концов на 50 мм.

Для получения сигнала от локального дефекта (ЛД) для разных слоев сборки в соответствующем слое протягивался имитатор обрыва. Датчик в свою очередь оставался неподвижным относительно сборки прутков. Для получения сигнала от потери сечения (ПС) величиной в один пруток в соответствующем слое протягивался конец прутка.

Данные эксперименты проводились для разного числа прутков в сборке. Таким образом имитировались ванты с разным числом стрендов и разным внешним диаметром. На основе данной модели были исследованы зависимости сигналов, вызванные дефектами в различных слоях

объекта от конфигурации возбуждающей и измерительных обмоток и от числа прутков в сборке. На основе полученных результатов была оптимизирована конфигурация измерительной системы.

Путем масштабирования параметров оптимизированного макета и корректировки рабочей частоты были получены параметры дефектоскопа для контроля реальных объектов. На основе полученных параметров была сконструирована и изготовлена МГ 120-300 ИНТРОС Е (рис. 4). МГ состоит из двух модулей 1 и 2, собранная МГ 120-300 центрируется относительно каната с помощью колесных устройств 6. ЭБ закреплен на МГ 4. Элементы дефектоскопа электрически соединяются друг с другом посредством кабелей. Особо следует отметить, что разработанная конфигурация возбуждающей и измерительных катушек индуктивности позволила разделить дефектоскоп на две части. Это существенно упростило процедуру проведения контроля.

Для проверки дефектоскопа в лабораторных условиях были изготовлены имитаторы мультистрендовых вант различного диаметра и с различным числом стрендов. На данных имитаторах были получены сигналы от дефекта в виде конца стренда в центральном и внешнем слоях. Для этих же дефектов были получены сигналы по каналу потери

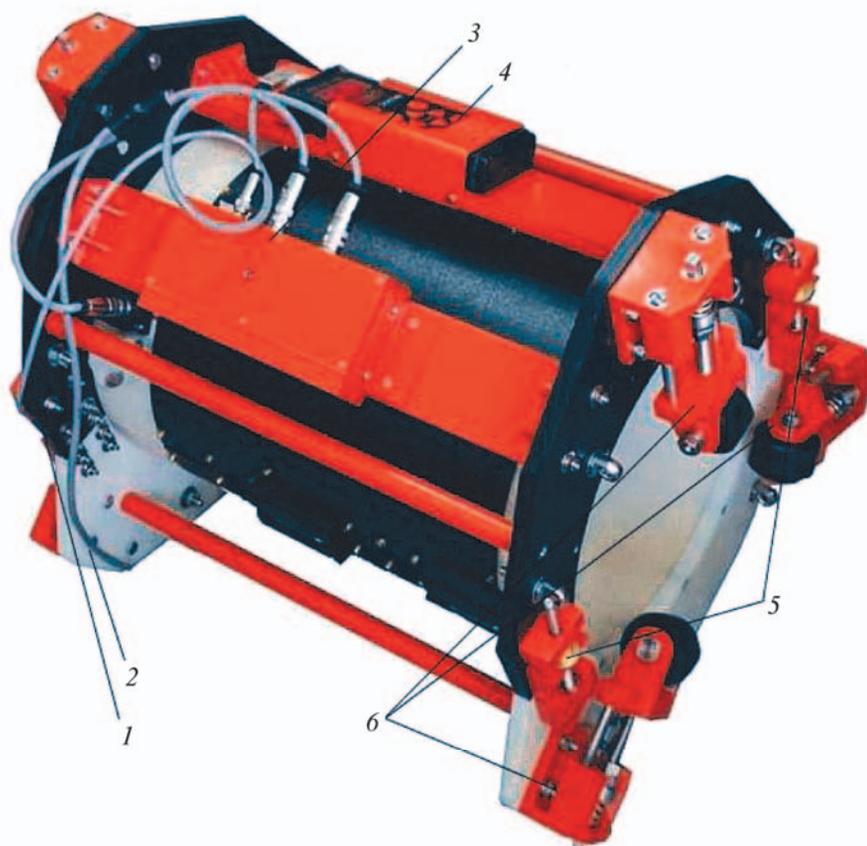


Рис. 4. Головка МГ 120-300

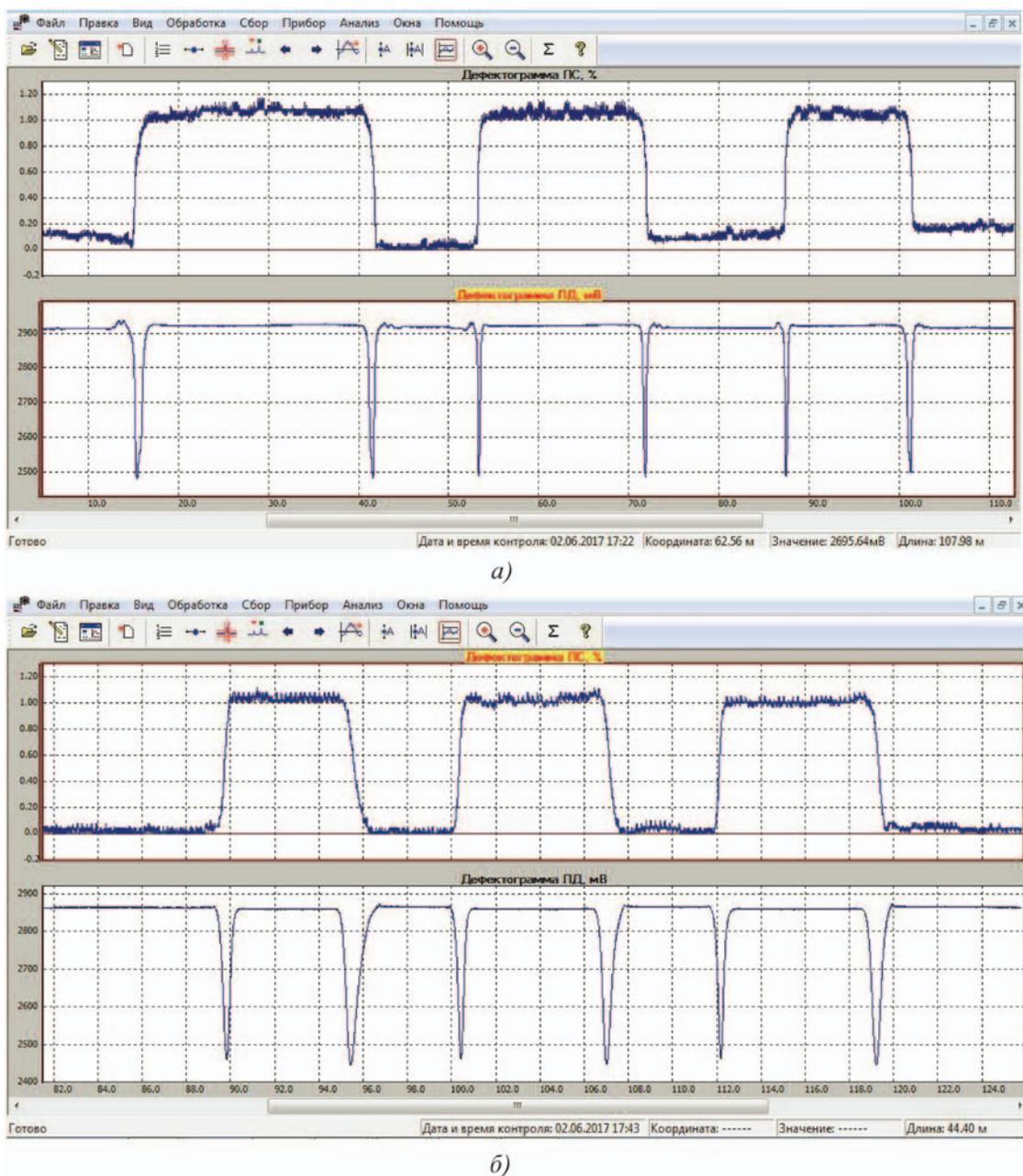


Рис. 5. Сигналы от конца стренда, расположенного во внешнем слое сборки (а) и в центре сборки (б) из 95 стрендов

металлического сечения ванты. Анализ сигналов показал, что сигналы дефектов во внешнем и внутренних слоях имеют сопоставимые величины.

Также на имитаторе было проверено влияние ряда мешающих факторов, таких как смещение оси ванты относительно оси дефектоскопа, поворот оси ванты относительно оси дефектоскопа. Полученные результаты показали что сигналы от дефектов могут быть выявлены на фоне помех от исследованных влияющих факторов. Примеры сигналов для сборки из 95 стрендов приведены на рис. 5.

На рисунках приведены дефектограммы канала относительной потери сечения и канала локальных

дефектов, полученные при вытягивании и вставлении обратно одного стренда из внешнего слоя сборки (рис. 5, а) и из центра сборки (рис. 5, б). Один стренд при этом составляет примерно 1,1 % от общего сечения сборки. Как видно из рисунков, по каналу ПС величина относительной потери сечения определяется правильно как для внешнего расположения, так и для внутреннего. Амплитуда сигнала по каналу ЛД примерно одинакова для обоих случаев, что позволяет рассчитывать на успешное обнаружение обрывов как внешних, так и внутренних стрендов.

Испытания на реальном объекте показали, что уровень помехи значительно ниже сигналов от

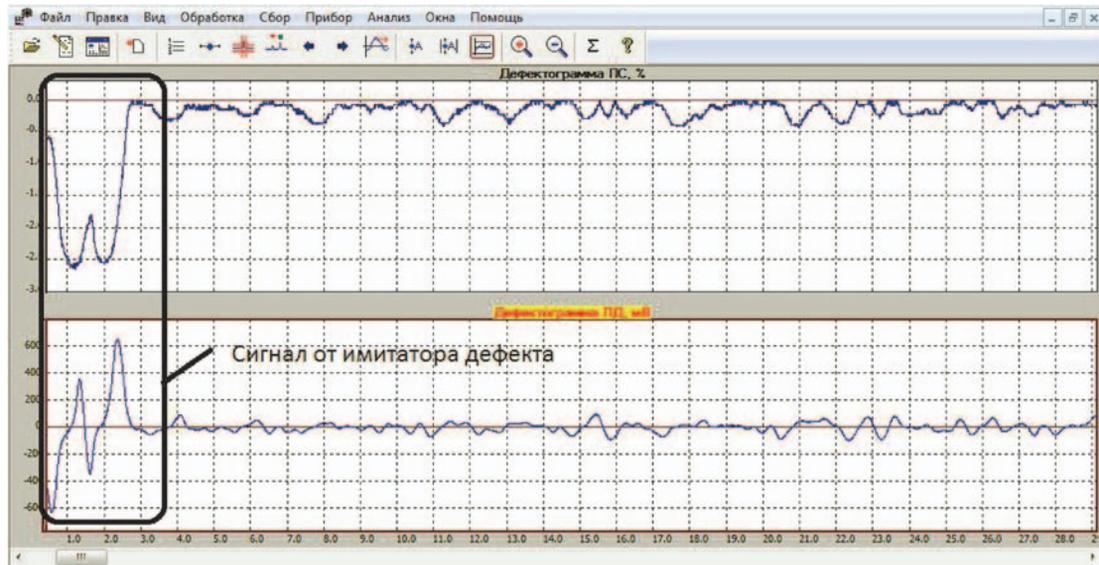


Рис. 6. Дефектограмма ванты моста на о. Русский

имитации обрыва стренда и таким образом обеспечена возможность обнаружения дефектов как во внешнем, так и во внутренних слоях.

Разработанный дефектоскоп позволяет контролировать ванты диаметром от 120 до 300 мм, при этом порог чувствительности по каналу локальных дефектов (обрывов) составляет обрыв одного стренда в ванте, содержащем до 95 стрендов. Дефектоскоп также обеспечивает возможность измерения относительной потери сечения с погрешностью не более 5 % площади ванты.

Пример дефектограммы ванты моста приведен на рис. 6. В начале дефектограммы по каналам ПС

и ЛД видны сигналы от калибровочного дополнительного стренда с относительным сечением 2 %, закрепленного на внешней оболочке ванты.

Разработанный дефектоскоп был использован для инструментального контроля состояния вант Большого Обуховского моста и вант моста на о. Русский. Значительных дефектов выявлено не было, что, вероятно, обусловлено достаточно малым сроком эксплуатации проконтролированных объектов. Были установлены места с подозрением на обрыв отдельных проволок внутри стрендов, а также локальные увеличения металлического сечения ванты. На рис. 7 и 8 приведены примеры соответ-

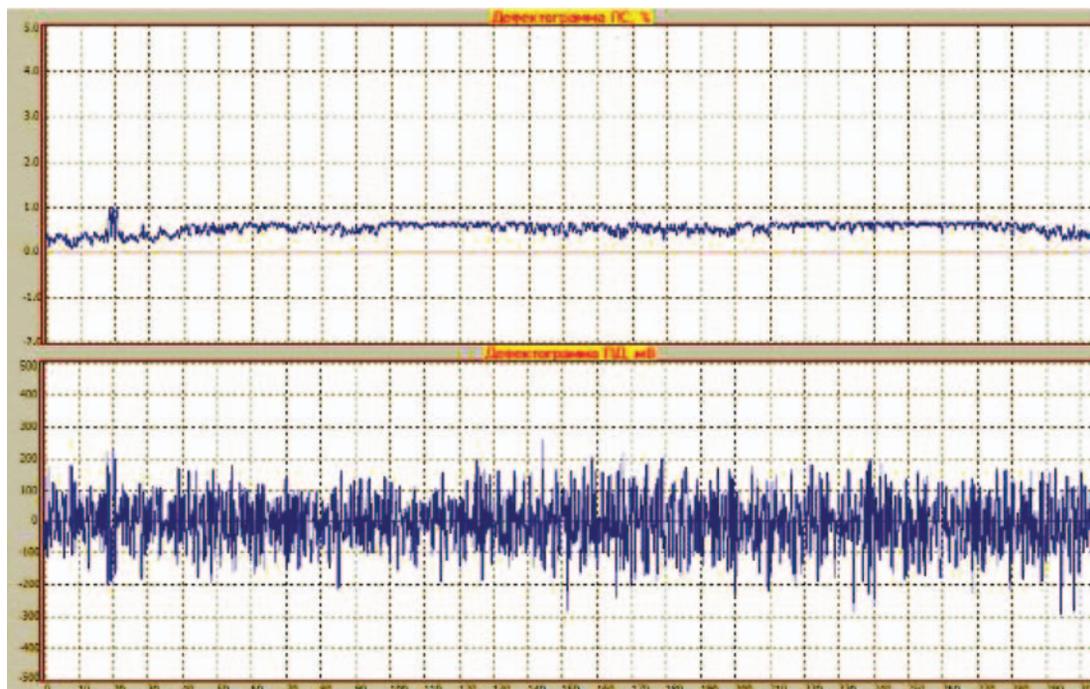


Рис. 7. Подозрение на обрыв проволоки стренда на отметке 19,2 м

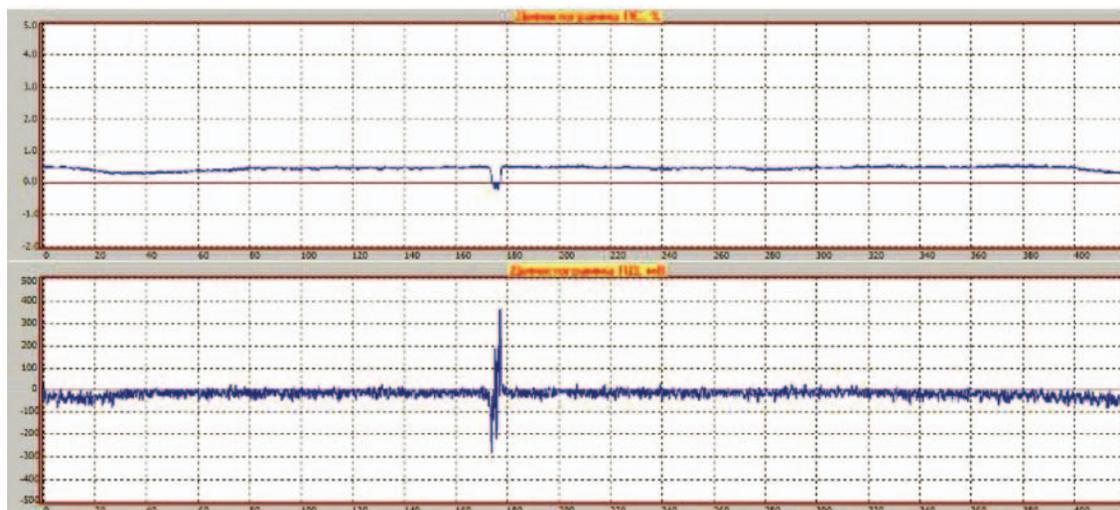


Рис. 8. Локальное увеличение металлического сечения ванты на отметке 175,3 м

ствующих дефектограмм. На первой дефектограмме на дистанции 20 м наблюдается сигнал, похожий на сигнал от обрыва проволоки стренда. На второй дефектограмме на дистанции 139 м присутствует сигнал, характерный для локального увеличения поперечного сечения, обусловленного, вероятно, сваркой проволок стренда. Верифицировать дефекты не представлялось возможным в связи с наличием на ванте плотной защитной оболочки.

Низкая масса, отсутствие притяжения между дефектоскопом и вантой, отсутствие необходимости намотки катушки индуктивности при сборке дефектоскопа делают процедуру контроля вант разработанным дефектоскопом достаточно технологичной. Таким образом, дефектоскоп может быть хорошей альтернативой приборам, реализующим традиционный магнитный неразрушающий контроль, для контроля мультистрендовых канатов большого диаметра.

Библиографический список

1. МIRONENKO А. С. Почему и как контролируют стальные канаты // В мире НК. 2006. № 2.
2. HD Stay Cables. URL: www.freyssinet.com
3. SSI 2000 stay cable system. URL: <http://www.vsl.com>
4. СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07–86.
5. ПБ 10-559–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. М.: Госгортехнадзор РФ, 2003.
6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения. Приказ федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12 ноября 2013 года № 533. М., 2013.
7. РД 03-348-00. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения. М.: Госгортехнадзор России, 2000.

8. ГОСТ Р 55612–2013. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. М., 2013.

9. Пат. 2204129 РФ. Способ неразрушающего контроля площади поперечного сечения и обнаружения локальных дефектов протяженных ферромагнитных объектов и устройство для его осуществления / В. В. Сухоруков, С. Б. Белицкий; заявл. 17.12.1999; Пат. США № 6.492.808 // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 33.

10. Белицкий С. Б., Касимов Г. А., Сухоруков В. В. Дефектоскоп стальных канатов «ИНТРОС» // В мире НК. 2006. № 2.

11. Bergamini A., Christen R. Non-destructive inspection of steel cables with large diameters for cable-stayed bridges / Schweiz, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation -UVEK-, Bundesamt für Strassen -ASTRA-, Bern (Hrsg.); Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt -EMPA-, Abteilung Ingenieur-Strukturen, Dübendorf (Ausführende Stelle) Zerstörungsfreie Untersuchung grosser Stahlseile bei Schrägseilbrücken: Forschungsaufträge AGB 2000/428 (93/00) auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung -AGB- Selbstverlag 2004, 75 S., Abb., Tab., Lit., Schn.

12. ГОСТ Р 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М., 2015.

13. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 5. Интроскопия и автоматизация неразрушающего контроля: практ. пособие / В. В. Сухоруков, Э. И. Вайнберг, Р.-Й. Ю. Кажис, А. А. Абакумов; под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1993.

14. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969.

References

1. Mironenko A. S. (2006). Why and how to control steel ropes. *V mire NK*, (2). [in Russian language]
2. HD Stay Cables. Available at: www.freyssinet.com
3. SSI 2000 stay cable system. Available at: <http://www.vsl.com>
4. Bridges and pipes. Inspection and testing rules. Updated edition of SNiP 3.06.07–86. *Joint Venture No. SP 79.13330.2012. Russian Federation*. [in Russian language]

5. Rules for the design and safe operation of passenger overhead and towing cableways. (2003). *Industrial Safety No. PB 10-559-03. Russian Federation*. Moscow: Gosgortekhnadzor RF. [in Russian language]

6. *Federal norms and rules in the field of industrial safety. Safety regulations for hazardous production facilities using lifting equipment*. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of November 12, 2013 No. 533. Moscow. [in Russian language]

7. Guidelines for magnetic flaw detection of steel cables. The main provisions. (2000). *Guidance document No. RD 03-348-00*. Russian Federation. Moscow: Gosgortekhnadzor Rossii. [in Russian language]

8. Non-destructive magnetic testing. Terms and Definitions. (2013). *Ru Standard No. GOST R 55612-2013. Russian Federation*. Moscow. [in Russian language]

9. Suhorukov V. V., Belitskiy S. B. (2003). Method for non-destructive testing of cross-sectional area and detection of local defects of extended ferromagnetic objects and device for its implementation. *Ru Patent No. 2204129. Russian Federation*. [in Russian language]

10. Belitskiy S. B., Kasimov G.A., Suhorukov V. V. (2006). Flaw detector steel cables "INTROS". *V mire NK*, (2). [in Russian language]

11. Bergamini A., Christen R. (2004). *Non-destructive inspection of steel cables with large diameters for cable-stayed bridges*. Schweiz, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation -UVEK-, Bundesamt für Strassen -ASTRA-, Bern (Hrsg.); Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt -EMPA-, Abteilung Ingenieur-Strukturen, Dübendorf (Ausführende Stelle) Zerstörungsfreie Untersuchung grosser Stahlseile bei Schrägseilbrücken: Forschungsaufträge AGB 2000/428 (93/00) auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung -AGB- Selbstverlag 2004, 75 S., Abb., Tab., Lit., Schn.

12. Nondestructive control. Classification of species and methods. (2015). *Ru Standard No. GOST R 56542-2015*. Russian Federation. Moscow. [in Russian language]

13. Suhorukov V. V. (Ed.), Vaynberg E. I., Kazhis R.-Y. Yu., Abakumov A. A. (1993). *Non-destructive testing: in 5 books. Book 5. Introscopy and Automation of Non-Destructive Testing: A Practical Guide*. Moscow: Vysshaya shkola. [in Russian language]

14. Kifer I. I. (1969). *Tests of ferromagnetic materials*. Moscow: Energiya. [in Russian language]



Спектр

Издательский дом

В. Н. Данилов, Л. В. Воронкова

ПРОСТО О ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С ФАЗИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ



390 руб.

ISBN 978-5-4442-0144-2.

Формат - 60x90 1/16, 136 страниц. Год издания - 2019, издание 1-е.

Практически без формул дается простое описание физических основ работы преобразователей с фазированными решетками (ПФР), доступное дефектоскопистам любого уровня подготовки, отмечаются особенности, отличающие ПФР от преобразователей с обычными (цельными) пьезопластинами, обращается внимание на преимущества и ограничения их применения. Рассматриваются особенности формирования сигнала прямого линейного ПФР и влияния ряда факторов на его характеристики, особенности формирования сигналов прямого и наклонного ПФР с линейными решетками при наличии акустической задержки, влияющей на их характеристики.

Рассматриваются особенности излучаемых и регистрируемых сигналов прямых ПФР с прямоугольной (двухмерной) решеткой с различным отношением размеров сторон. Показано влияние формы решетки на изменение амплитуды излучаемого ПФР-сигнала вдоль акустической оси, диаграмму направленности, зависимость амплитуды донного сигнала и др.

Приводятся некоторые результаты сравнения теоретических и экспериментальных характеристик ПФР и описываются особенности и возможности их практического применения при ультразвуковом контроле. Показано, что теоретические модели прямых и наклонных преобразователей с линейной фазированной решеткой в целом адекватно описывают работу ПФР. Приведен ряд примеров использования ПФР в практическом контроле, показывающих их особенности и реальные возможности.

Монография полезна для повышения квалификации специалистов по ультразвуковому методу контроля и как учебное пособие для студентов и аспирантов при изучении соответствующего курса.

www.idspektr.ru

119048, г. Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1. 000 «Издательский дом «Спектр»
Телефон отдела реализации: (495) 514-26-34. Дополнительный телефон офиса: (926) 615 17 16.

E-mail: zakaz@idspektr.ru. Http://www.idspektr.ru