

УДК 620.179.147

ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАНАТОВ ИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРЯДЕЙ

A. V. SEMENOV

ООО «ИНТРОН ПЛЮС»

Москва, Россия

UDC 620.179.147

EDDY CURRENT PROBE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF MULTI-STRAND STAY CABLES

A. V. SEMENOV

Аннотация. Статья посвящена вихретоковому контролю канатов из параллельных прядей (стрендовых канатов). Основным препятствием в применении вихретокового метода является помеха от неоднородности магнитных свойств стали. Подавление указанной помехи путем стабилизации магнитных свойств в результате намагничивания до состояния, близкого к магнитному насыщению, в данном случае практически не осуществимо ввиду конструктивных особенностей вант. В статье кратко описана полученная на основе численного моделирования конфигурация вихретокового преобразователя (ВТП), повышающего достоверность обнаружения дефектов без стабилизации магнитных свойств объекта контроля (ОК), и приведены результаты экспериментальной проверки выводов, полученных в ходе численного моделирования.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, стрендовые канаты, помеха.

Abstract. The article is devoted to eddy current nondestructive testing of multi-strand stay cables. The main obstacle to the use of the eddy current method is noise from inhomogeneity of magnetic properties of the steel. Suppression of this noise by stabilizing the magnetic properties as a result of magnetization by a strong magnetic field in this case is practically not achievable due to the design features of the stay cables. The article briefly describes the configuration of the eddy current probe obtained on the basis of numerical modeling which increases the reliability of defects detection without stabilizing the magnetic properties of the test object, and presents the results of experimental verification of the conclusions obtained during numerical modeling.

Keywords: eddy current testing, multi-strand stay cables, noise.

Введение. Стальные канаты широко используются для решения разных технических задач. Существует большое количество разных типов стальных канатов, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками и имеет свою сферу применения. В последние десятилетия получили значительное распространение так называемые стрендовые канаты. Стренд (дословно прядь) – это специальный высокопрочный канат, как правило, выполненный из семи стальных проволок и имеющий защитное полиэтиленовое покрытие. Все стренды каната проходят внутри общей защитной оболочки из полиэтилена высокой плотности [1, 2].

Основной сферой применения стрендовых канатов являются ванты, т. е. неподвижные канаты, предназначенные для удержания различных конструкций. В частности, такие канаты нашли широкое применение в области

строительства вантовых мостов, где ванты являются одними из основных несущих элементов, что делает актуальной задачу неразрушающего контроля целостности стрендовых канатов [3].

Анализ используемых для неразрушающего контроля стрендовых канатов методов [4] показывает, что все они имеют существенные ограничения и недостатки. Магнитный метод требует применения громоздких систем намагничивания, что повышает трудоемкость контроля, а для стрендовых канатов большого диаметра делает контроль практически невозможным, т. к. сила притяжения системы намагничивания к стрендам совместно с силой тяжести с большой вероятностью приведут к повреждению внешней защитной оболочки ванты. Возможность доступа в лучшем случае лишь к торцам стрендов ограничивает использование акустических методов с контактным возбуждением. Применение акустических методов с бесконтактным возбуждением ограничено необходимостью создания сильных магнитных полей по всему сечению каната, что приводит к недостаткам, указанным для магнитного метода. Пассивные акустические методы ограничены в основном системами мониторинга и, соответственно, не могут быть использованы для оперативного контроля состояния объекта. Оптический и визуальный методы контроля достоверно позволяют обнаружить лишь внешние дефекты. Применение радиографического метода ограничивают трудоемкость и повышенные требования по обеспечению безопасности работ, что, в свою очередь, приводит к высокой стоимости контроля.

Таким образом, актуальной является задача поиска метода неразрушающего контроля, позволяющего преодолеть указанные ограничения и недостатки.

Сложности использования вихретокового вида. Одним из видов неразрушающего контроля, не нашедшим пока широкого применения для дефектоскопии стрендовых канатов, является вихретоковый вид неразрушающего контроля. Вихретоковый вид способен обеспечить высокую производительность, относительно малый вес вихретокового преобразователя (ВТП), бесконтактность. Затрудняет использование вихретокового вида на объектах из ферромагнитных материалов помеха от структурных неоднородностей стали [3, 5]. Опыты показывают, что на фоне помехи особенно сложно обнаруживать сигналы от дефектов, расположенных во внутренних слоях каната. Традиционный способ уменьшения указанной помехи путем стабилизации магнитных свойств в результате намагничивания до состояния, близкого к магнитному насыщению, в данном случае практически не реализуем, т. к. приводит к описанным выше недостаткам и ограничениям магнитного метода. Таким образом, ВТП, предназначенный для дефектоскопии стрендовых канатов, должен обеспечивать достоверное обнаружение дефектов без стабилизации магнитных свойств объекта контроля.

Численное моделирование. Разработка ВТП, соответствующего указанным требованиям, проводилась на основе численной модели [6], позволяющей моделировать вихретоковый контроль стрендовых канатов. Рассматривались сигналы, обусловленные локальными дефектами (ЛД) и протяженными дефектами [3, 7, 8].

Результаты численного моделирования [8] показали, что для традиционно используемого ВТП на основе протяженной катушки возбуждения амплитуда сигнала от ЛД во внешнем слое каната более чем в 3 раза превышает сигнал от аналогичного дефекта в центральном слое. Можно предположить, что та составляющая помехи, которая обусловлена схожим с моделируемым дефектом изменением электромагнитных свойств, также зависит от глубины его залегания в канате. В таком случае неоднородность магнитных свойств во внешнем слое будет вносить преобладающий вклад в помеху, в результате чего помеха, вызванная внешними слоями, будет скрывать сигналы от дефектов во внутренних слоях.

Результаты численного моделирования [8] показали, что избежать указанных недостатков позволяет ВТП, возбуждающий неоднородное электромагнитное поле в зоне контроля. Одним из вариантов такого преобразователя может быть показанный на рис. 1 ВТП на основе «узкой» возбуждающей катушки, протяженность которой в осевом направлении намного меньше её диаметра.

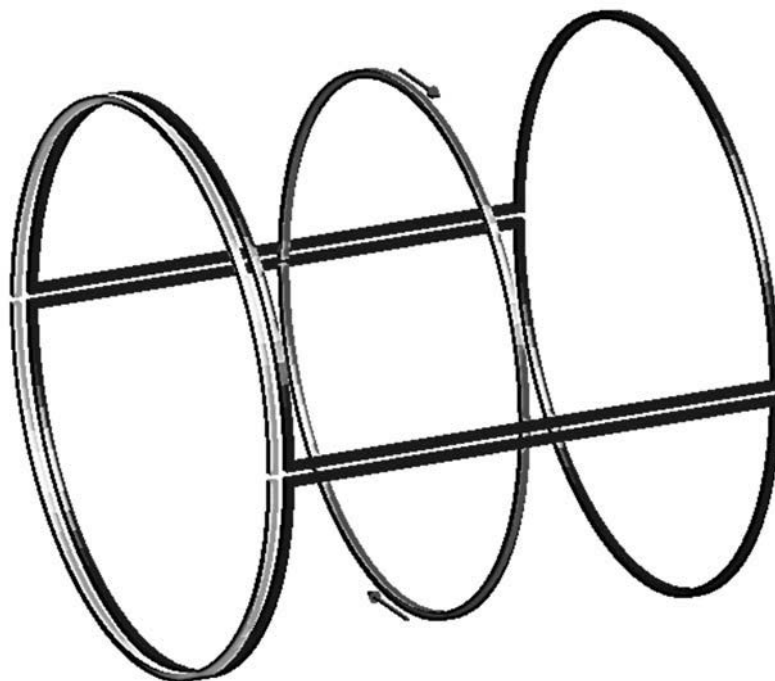


Рис. 1. ВТП на основе «узкой» катушки возбуждения: красным цветом показана возбуждающая катушка, синим – катушка для обнаружения ЛД, зеленым – катушка для измерения ПС

Для такого ВТП соотношение сигналов от дефектов в разных слоях имеет выраженную зависимость от расстояния между измерительными катушками (базы ВТП) для ЛД и расстояния между измерительной и возбуждающей катушками для протяженных дефектов. Существуют диапазоны значений указанных величин, обеспечивающие преимущественную чувствительность к дефектам во внешнем слое, преимущественную чувствительность к дефектам во внутренних слоях или равную чувствительность к дефектам во внешнем и

внутренних слоях. Таким образом, использование ВТП, обеспечивающего, например, равную чувствительность к дефектам во внешнем слое и внутренних слоях, повысит совокупную достоверность обнаружения дефектов за счет повышения соотношения сигнал/помеха для дефектов, расположенных во внутренних слоях [8].

Для проверки выводов, полученных в ходе численного моделирования, были использованы масштабные модели и макеты стрендовых канатов.

Масштабная модель. Ввиду большой массы стрендовых канатов создание макета стрендового каната, позволяющего провести полноценную проверку результатов численного моделирования, является трудоемкой задачей. В связи с этим для указанных целей была изготовлена масштабная модель. Масштабная модель каната выполнена из металлических прутков, помещенных в изоляционный материал. Один пруток соответствовал одному стренду. Прутки были уложены параллельно друг другу. Поперечное сечение в любом месте сборки было близко по форме к шестиграннику. Число прутков в сборке изменялось от 19 (три слоя) до 91 (шесть слоев). Во всех слоях, за исключением второго, были реализованы имитаторы компактных дефектов в виде обрыва прутка (рис. 2). Расстояние между концами прутков имитатора компактного дефекта составляло три диаметра прутка.

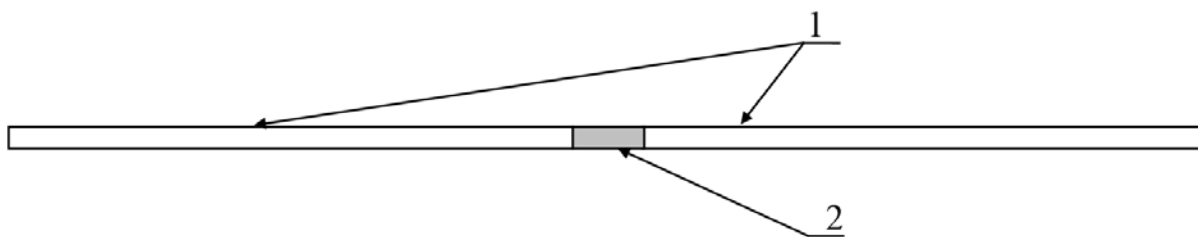


Рис. 2. Имитатор компактного дефекта: 1 – стальной пруток; 2 – диэлектрическая прокладка

Конструкция макета ВТП позволяла изменять расстояние между измерительными катушками и использовать различную конфигурацию обмотки возбуждения (узкая/протяженная). Масштабная модель стрендового каната и масштабная модель ВТП показаны на рис. 3. Для получения сигнала от компактного дефекта в разных слоях сборки осуществлялось перемещение имитатора ЛД относительно ВТП. Для получения сигнала от распределенного дефекта в соответствующем слое вытягивался пруток целиком. ВТП в обоих случаях оставался неподвижным относительно сборки прутков.

На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны значения следующей величины (*относительная вариация сигнала*): $\delta = (\max \Delta U_{\text{вн}^*} - \min \Delta U_{\text{вн}^*}) / \Delta U_{\text{вн}^* \text{центр}}$, где $\max \Delta U_{\text{вн}^*}$ – модуль максимальной амплитуды сигнала среди сигналов от расположенных в разных слоях каната дефектов, $\min \Delta U_{\text{вн}^*}$ – модуль минимальной амплитуды сигнала среди сигналов от расположенных в разных слоях каната дефектов, $\Delta U_{\text{вн}^* \text{центр}}$ – модуль амплитуды сигнала от дефекта в центральном слое.

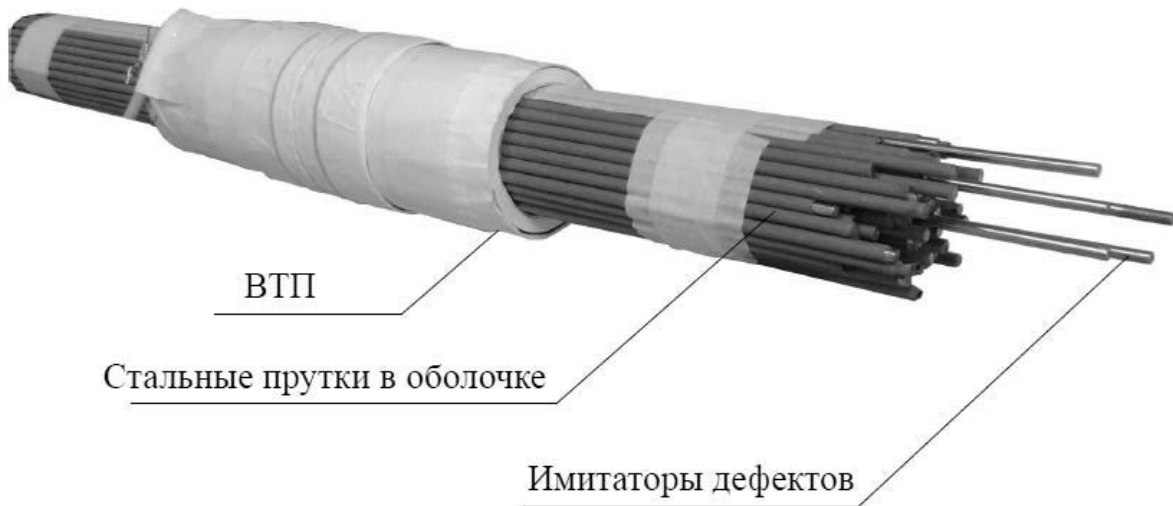


Рис. 3. Испытательный стенд (масштабная модель стренового каната, масштабная модель ВТП, имитаторы дефектов)

На рис. 4 и 5 в качестве примера показаны зависимости относительной вариации амплитуды сигнала ЛД от расстояния между измерительными катушками (базы) дифференциального ВТП на основе «узкой» и «протяженной» катушек возбуждения для масштабных моделей канатов, содержащих различное количество слоёв.

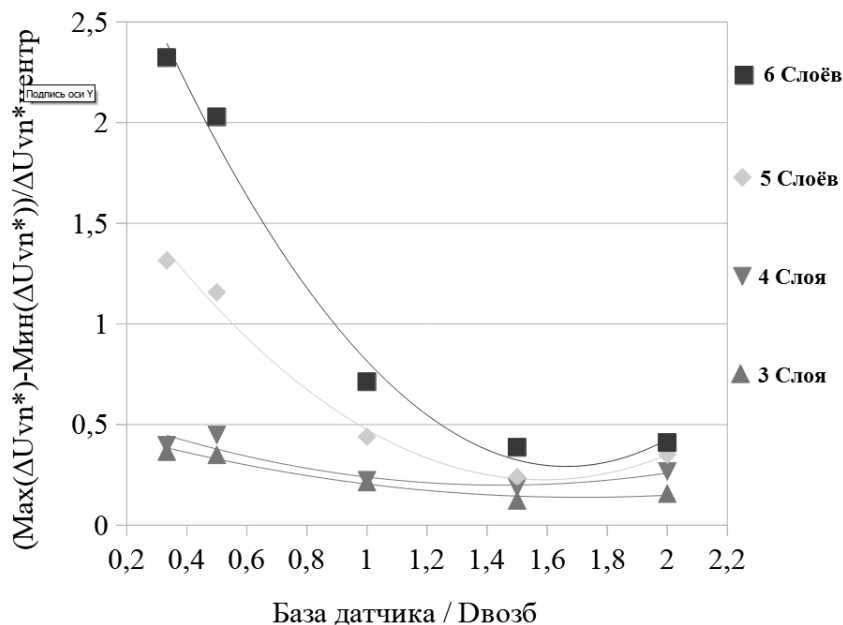


Рис. 4. Влияние базы дифференциального ВТП с узкой катушкой возбуждения на относительную вариацию сигналов ЛД

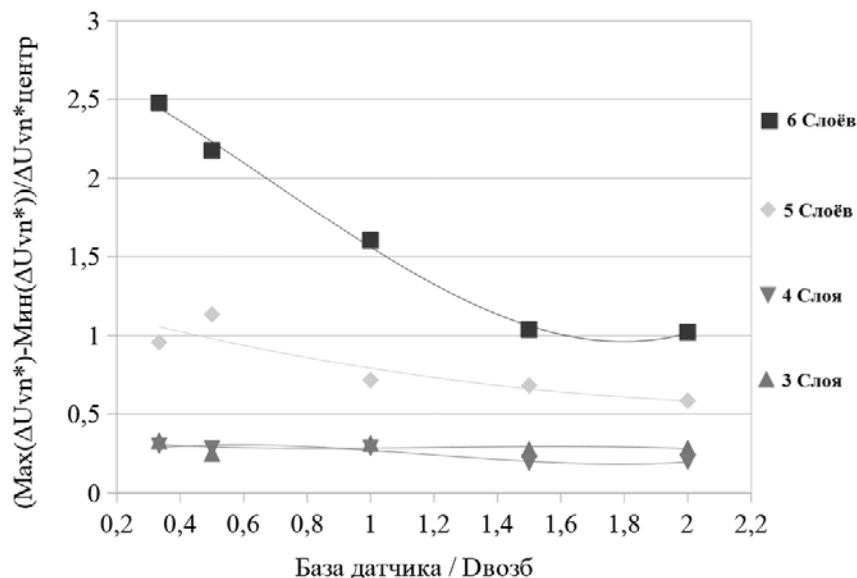


Рис. 5. Влияние базы дифференциального ВТП с протяженной катушкой возбуждения на относительную вариацию сигналов ЛД

Полученные зависимости подтвердили выводы, сделанные по результатам численного моделирования. Если для ВТП на основе протяженной катушки возбуждения сигналы от ЛД в различных слоях каната имеют сильно отличающиеся значения вне зависимости от базы датчика, то для ВТП на основе узкой катушки возбуждения существует такая база, при которой сигналы от ЛД во всех слоях имеют близкие значения.

Аналогично экспериментальные данные подтвердили существование положения измерительной катушки абсолютного ВТП с узкой катушкой возбуждения, обеспечивающего близкие чувствительности для протяженных дефектов.

Макет каната. В связи с тем, что масштабная модель может не учитывать характерные для реального стренового каната особенности, были изготовлены макеты стреновых канатов. Макеты позволяли имитировать дефекты только в центральном и внешнем слоях. На макетах были проведены эксперименты, подтвердившие выводы, сделанные относительно ВТП на основе узкой и протяженной катушек возбуждения. На рис. 6 в качестве примера приведены зависимости размаха сигнала дифференциального ВТП, вызванного перемещением конца стренда во внешнем слое и в центральном слое, от базы дифференциального ВТП. Видно, что кривые пересекаются, т. е. существует база ВТП, обеспечивающая близкую чувствительность к дефектам во внешнем и центральном слоях, что соответствует результатам, полученным ранее на численной модели, и результатам на масштабной модели.

Выводы. Экспериментальные данные подтверждают сделанный в [8] на основе результатов численного моделирования вывод о возможности изготовления ВТП, обеспечивающего близкую чувствительность к дефектам, расположенным в разных слоях стренового каната. Это, в свою очередь,

позволяет повысить достоверность обнаружения дефектов без стабилизации магнитных свойств ОК.

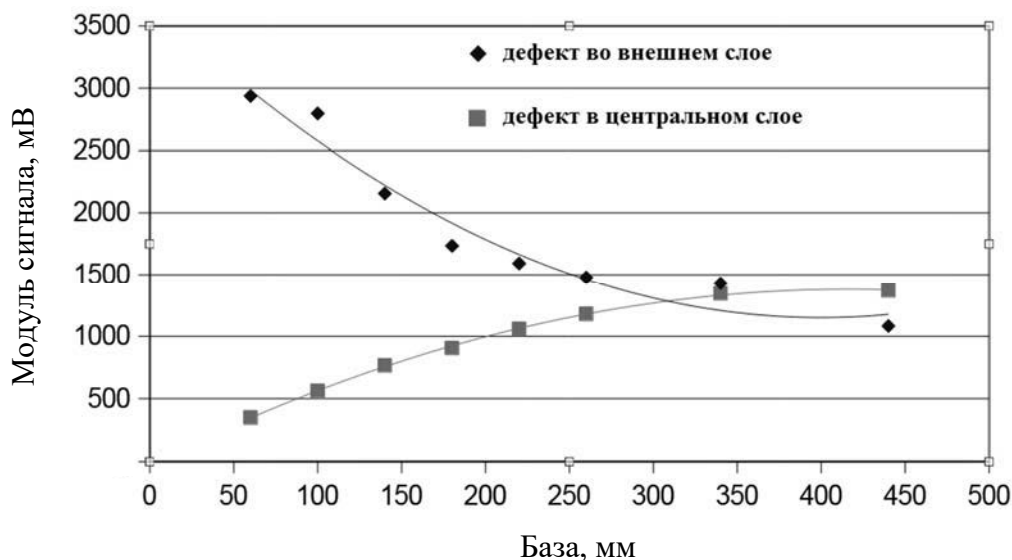


Рис. 6. Зависимость величины размаха сигнала дифференциального ВТП, вызванного дефектами в центральном и внешнем слоях, от базы датчика

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. HD Stay Cables [Electronic resource]. – Mode of access: www.freyssinet.com.
2. SSI 2000 stay cable system [Electronic resource]. – Mode of access: www.vsl.com.
3. Семенов, А. В. Неразрушающий контроль стрендовых канатов больших диаметров / А. В. Семенов, Д. А. Слесарев // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 4. – С. 20–27.
4. Tabatabai, H. Maintenance and Inspection of Bridge Stay Cable Systems / H. Tabatabai // FHWA Workshop on Wind-Induced Vibration of Cable Stayed Bridges At: conf. – St. Louis, Missouri, 2006.
5. Вихретоковый проходной преобразователь для дефектоскопии продольно-протяженных изделий: пат. RU 2146362. – Опубл. 10.03.2000.
6. Семенов, А. В. Математическое моделирование вихретокового неразрушающего контроля стрендовых канатов / А. В. Семенов, Д. А. Слесарев // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 11. – С. 4–11.
7. РД 03-348-00. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения. – Москва: Госгортехнадзор России, 2000.
8. Семенов, А. В. Повышение соотношения сигнал/помеха при вихретоковом контроле за счет создания неоднородного электромагнитного поля / А. В. Семенов // Контроль. Диагностика. – 2022. – Т. 25, № 9. – С. 4–13.

E-mail: asemenov@intron.ru.