



NDT World, 2015, v. 18, no. 4, pp.

DOI:

Оценка метрологических параметров в магнитном неразрушающем контроле

Submitted 09.09.15

Accepted 22.09.15

Метрология очень важна в НК. Точная прямая оценка метрологических параметров приборов НК (таких как погрешность, порог чувствительности и др.) и технологий НК затруднительна. На практике реальные условия контроля могут значительно отличаться от существующих при метрологической калибровке прибора, что необходимо учитывать во избежание недоразумений при оценке его возможностей в этих условиях. Это относится практически ко всем методам и приборам НК, но особенно важно в электромагнитном и магнитном методах НК объектов из ферромагнитных материалов, таких как стальные канаты, трубы и др. Статья может быть полезна в практике специалистов по магнитному НК ферромагнитных объектов и, прежде всего, стальных канатов.

V. V. Sukhorukov¹

Magnetic Nondestructive Testing: Metrological Parameters Evaluation

Metrology is very important for nondestructive testing. The accurate evaluation of NDT instruments and technologies metrological parameters is a problem. It should be taken into consideration that the parameters (such as accuracy, threshold of sensitivity etc.) stated in the delivery documentation can differ significantly from those when the instruments and technologies are used in practice. If this difference is not taken into account, testing results can be substantially worse than they had been expected. The NDT technicians must be qualified enough to avoid this. Requirements for personnel skills are now included in the standards and norms on NDT technologies for concrete objects. Personnel qualification requirements regarding to NDT of steel wire ropes are now under consideration. Unfortunately, technicians do not always meet the requirements. This applies to almost all NDT methods and devices but especially to electromagnetic and magnetic flow leakage methods when they are used for testing of ferromagnetic objects, such as steel wire ropes, steel-cord conveyor belts, tubes, oil and gas tanks. The paper can be useful for NDT specialists in their practice of ferromagnetic objects testing, particularly of steel wire ropes.

Keywords: metrology, magnetic inspection, sensitivity limit, signal-to-noise ratio, steel rope, MFL testing

Введение

Метрологическое обеспечение — актуальная проблема применения НК, особенно для правильного выбора соответствующей технологии и прибора с целью правильной интерпретации получаемых данных. Проблема становится более значительной в связи с переходом от обнаружения дефектов к их идентификации и определению размеров.

В то же время метрология в НК довольно специфична из-за множества влияющих на получаемые данные факторов, таких, например, как форма и положение дефекта, характеристики материала объекта контроля (ОК) и его структура, положение датчиков прибора относительно объекта контроля и многих других.

Для определения метрологических характеристик приборов (или технологий) НК существуют различные методы.

Некоторые из них отражены в стандартах и других нормах. Другие применяются только производителями приборов. Но зачастую и те и другие не слишком хорошо известны пользователям, что порой приводит к недоразумениям и недовольству с их стороны, в частности, возникают необоснованные требования к характеристикам прибора НК, например, к его точности, порогу чувствительности и т.д. Иногда эти требования возникают на основе характеристик, обычно устанавливаемых процедурой калибровки для определенных условий контроля, таких как степень однородности материала ОК, структура объекта, состояние его поверхности и др. Но реальные условия контроля отличаются от условий при калибровке или от указанных в спецификации прибора.

На самом деле числовые значения метрологических параметров различ-

ны: одни определяются возможностями прибора (обычно в оптимальных условиях), а другие — реальными условиями контроля. Первые устанавливаются в процессе сертификации прибора, а вторые зависят от условий контроля, прежде всего от характеристик ОК. Различия между значениями этих параметров показаны далее по отношению к магнитному НК. Реальные практические примеры, главным образом из НК стальных проволочных канатов, приведены для иллюстрации.

Метрологический аспект обнаружения дефектов

Почти все технологии и приборы НК относятся к непрямым методам и средствам измерений. Даже такие технологии, как капиллярные и магнитопорошковые. Существует мнение, что приборы, предназначенные только для

**СУХОРУКОВ
Василий Васильевич**

Президент
ООО «ИНТРОН ПЛЮС»,
Москва. Профессор, д. т. н.,
III уровень квалификации
по электромагнитному,
магнитному и вихрето-
ковому видам контроля.
Лауреат Государственной
премии РФ в области
науки и техники (1997 г.),
академик Международ-
ной Академии НК.



¹ INTRON PLUS Ltd., Moscow, Russia; vsukhorukov@intron.ru

обнаружения дефектов в виде нарушений сплошности, не относятся к средствам измерений и поэтому не требуют метрологического обеспечения. Но такой подход ошибочен, так как даже точность установки и стабильность порога чувствительности (или порога обнаружения) должны быть определены количественно. Достоверность обнаружения дефекта должна быть оценена вероятностью правильного обнаружения дефекта и вероятностью его пропуска [1]. Тем не менее, многие пользователи и производители приборов НК принимают во внимание только порог чувствительности без оценки его стабильности — так же, как и без оценки вероятности правильного обнаружения. Все это ведет к ошибкам обнаружения дефектов и, в результате, к необоснованным претензиям к приборам со стороны пользователей.

Следует отметить, что порог чувствительности к дефектам определяется как дефект минимальных размеров, который может быть обнаружен прибором. То есть чем ниже порог чувствительности, тем выше способность обнаружения дефекта. Однако термин «чувствительность» часто используется вместо термина «порог чувствительности». Это некорректно, поскольку «чувствительность» означает дифференциальную величину, которая представляет собой отношение приращения выходной величины к соответствующему приращению входной. Например, отношение приращения сигнала датчика дефектоскопа к приращению глубины (ширины, площади и др.) дефекта.

В настоящее время решение о наличии или отсутствии дефектов чаще всего принимается оператором субъективно. Он делает это, основываясь на визуальном образе контролируемого участка объекта контроля (визуальный и рентгеновский НК, капиллярный и магнитопорошковый НК) или на виртуальном образе (ультразвуковой, тепловой, вихретоковый НК и НК методом регистрации магнитных полей рассеяния). В любом случае решение оператора зависит не только от характеристик дефекта, но также и от характера шума и его уровня. Уровень шума и другие его характеристики (периодичность, спектр) зависят от состояния ОК так же, как и от типа и параметров прибора. Влияние окружающей среды также может быть источником шума. Например, наводки от промышленных электромагнитных полей, которые обычно подавляются стандартными методами, такими как экранирование и фильтрация. Еще

один источник шума — собственный шум электроники прибора, датчиков и др. Но обычно он значительно меньше шума, связанного с ОК.

Шум обычно имеет случайный характер. Случайный шум, связанный с ОК, имеет очень важную особенность: его реализация совместно с сигналом от дефекта повторяется при повторении сканирования одного и того же участка объекта. Это означает, что шум коррелирован с сигналом. Чтобы выделить сигнал из шума стандартными методами, применяют декорреляцию ([1], с. 107–110).

Конечно, оператор использует разные критерии для обнаружения дефекта, не только отношение сигнал/шум. Но этот критерий обычно главный. Он особенно важен для автоматического обнаружения (с помощью специального программного обеспечения), например, в системах мониторинга состояния объекта.

Имитаторы, стандартные и контрольные образцы

Для оценки метрологических параметров приборов НК и их калибровки обычно используются контрольные образцы (reference samples). Они изготавливаются из части контролируемого объекта или его аналога. Стандартные образцы (эталоны, reference standards) обычно отличаются от контрольных тем, что они проходят сертификацию метрологическими службами и используются в процессе испытаний приборов при их выпуске или поверке. Имитаторы, моделирующие контролируемый объект или его часть, используют чаще всего в тех случаях, когда образец объекта (или его части) недоступен или слишком сложен.

Примером контрольного образца может служить отрезок стального каната с искусственными дефектами, который отрезан от испытуемого каната. Имитатор каната состоит из пучка стальных проволок или прутков с общей площадью поперечного сечения, равной суммарной площади сечения проволок имитируемого каната. При этом диаметр имитатора должен быть равен диаметру каната [2, 3].

Подобный подход применяется в ультразвуковом и вихретоковом НК. А для определения порога чувствительности в рентгеновском НК применяют в качестве контрольных образцов отрезки проволоки определенного диаметра. Заметим, что в этом случае используют термин «чувствительность» вместо правильного «порог чувствительности».

Весьма важно, чтобы эти контрольные образцы и имитаторы удовлетворяли определенным требованиям, воспроизводя свойства и параметры объектов как можно тщательнее. Оценка метрологических параметров прибора в этом случае будет достаточно точной. Однако если прибор используется для НК других объектов, отличающихся по своим характеристикам от упомянутых образцов, следует обратить на это внимание. В противном случае значения метрологических параметров могут отличаться, и результаты контроля будут некорректны. Например, порог чувствительности ультразвукового дефектоскопа, определенный с помощью образца из ферромагнитной стали с гладкой поверхностью, будет значительно выше (т.е. хуже), если дефектоскоп используется для НК чугуна с грубой поверхностью. Это хорошо известно экспертам по НК, но часто не широко известно пользователям. Встречаются случаи, когда различие особенностей образцов и объектов НК не очень значительно, но даже это может оказать влияние на результаты НК. Так, даже небольшое различие химического состава объекта из ферромагнитной стали и контрольного образца может привести к ошибкам при сортировке электромагнитным методом по группам с различной термообработкой. Это различие может быть настолько малым, что объект соответствует требованиям к химсоставу определенной марки стали, и, чтобы решить проблему, приходится применять образцы, изготовленные из этой же плавки, что и контролируемые объекты. А чтобы избежать возможных ошибок, связанных с влиянием структуры стали на результаты контроля, следует принять меры для обеспечения идентичности структуры материала образцов и ОК. Для этой цели обычно применяют нормализацию путем термообработки образцов и ОК.

Калибровочные и стандартные образцы обычно позволяют представить наиболее типичные ОК. Они должны быть воспроизводимы, а стандартные образцы — пригодны для сертификации. Требования к ним содержатся в различных нормах, инструкциях, рекомендациях. Обычно они позволяют проверять только главные метрологические параметры при отсутствии помех. Это необходимо учитывать, чтобы предотвратить возможные существенные ошибки при использовании прибора. Очевидно, что значение порога чувствительности как наиболее важного параметра дефектоскопа, опреде-

ленное без влияния помех, может быть некорректно в условиях реального НК из-за их влияния.

Было бы целесообразно назвать метрологический параметр (порог чувствительности) в первом случае **инструментальным**, а во втором (для конкретного НК) — **технологическим**. Очевидно, что при одном и том же значении инструментального параметра может быть множество значений для технологических.

Все сказанное относится также и к имитаторам, и даже в большей степени, поскольку они имеют более простую структуру, чем объекты контроля, и некоторые влияющие факторы реальных условий контроля могут отсутствовать. Например, имитатор стальных канатов [4] для проверки работоспособности и калибровки двухканального магнитного дефектоскопа состоит из пучка параллельных стальных проволок (или прутков) и не воспроизводит периодическую структуру прядевого каната (рис. 1). Поэтому он не создает периодический шум, типичный при дефектоскопии прядевых канатов. Изменения площади поперечного сечения каната имитируют удалением одной или нескольких проволок имитатора, проверяя таким образом градуировочную кривую дефектоскопа по каналу измерения потери сечения. Сигналы по каналу локальных дефектов проверяют, пропуская через имитатор проволоки с имитацией обрывов.



Рис. 1. Калибровка магнитного дефектоскопа ИНТРОС-АВТО с помощью имитатора стального каната

Подобный подход используется и в случае добавления отрезков проволок к участку контролируемого каната, охваченного магнитной головкой дефектоскопа. Это позволяет проверить работоспособность и калибровку прибора. Однако описанная технология имитации ОК не позволяет правильно оценить основной метрологический параметр дефектоскопа — порог чувствительности к дефектам, поскольку магнитная головка не движется вдоль каната, и шум,

связанный со структурой каната и его неоднородностью, отсутствует.

Имитатор резинотросовой конвейерной ленты [5] для калибровки магнитного дефектоскопа состоит из каркаса, в котором размещены параллельно пучки стальных проволок, имитирующие кордовые канаты ленты (рис. 2). Он позволяет уменьшать площадь сечения отдельных пучков удалением части проволок, моделируя потерю сечения кордовых канатов из-за коррозии, а также их обрывы.



Рис. 2. Калибровка магнитного дефектоскопа ИНТРОКОН с помощью имитатора резинотросовой конвейерной ленты

Другой пример — контрольный образец для калибровки магнитного дефектоскопа для НК днищ и нижнего яруса стенок вертикальных стальных резервуаров [6]. Он представляет собой вырезанную часть стального листа с глухими отверстиями разного диаметра и глубины (рис. 3). Толщина и марка стали листа такие же, как и в контролируемом резервуаре, изоляционное по-

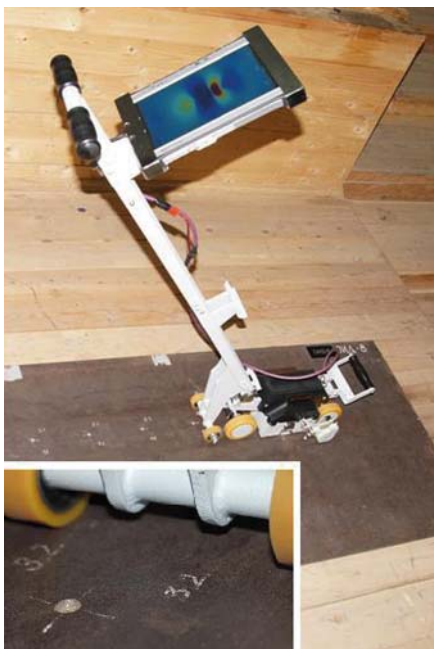


Рис. 3. Калибровка магнитного дефектоскопа ИНТРОКОР с помощью контрольного образца участка днища стального резервуара

крытие днища моделируется пластиковыми прокладками разной толщины или установкой определенного воздушного зазора между поверхностью образца и магнитной системой дефектоскопа.

Контрольные образцы для испытаний и калибровки внутритрубных магнитных дефектоскопов [7] обычно выполняют в виде включенных в модель трубопровода (стенда) участков с искусственными дефектами. Дефекты весьма разнообразны по форме, размерам, положению (на внутренней или внешней поверхности трубы), ориентации относительно оси трубы (для трещин) и др. Все они аттестуются метрологически. Стенд оборудуют камерами пуска и приема автономных снарядов-дефектоскопов, которые перемещаются с заданной скоростью внутри трубы под напором заполняющей её жидкости или протягиваются механически («сухой» стенд, рис. 4).



Рис. 4. Загрузка магнитного внутритрубного снаряда-дефектоскопа ВИД219 в камеру пуска испытательного («сухого») стенда

Чтобы обеспечить получение статистических данных для определения достоверности обнаружения дефектов, необходимо создать условия многократного прохождения трубы стенда дефектоскопом. Поэтому труба образует замкнутый контур. Несколько таких контуров, каждый из которых соответствует трубе определенного диаметра, входят в состав испытательного полигона, включающего в себя также перекачивающее и иное оборудование, резервуары и др. Очевидно, что это весьма сложное и дорогое сооружение.

Метрологическое обеспечение магнитного НК стальных канатов

Характерная особенность магнитного НК стальных канатов состоит в сильной зависимости получаемых данных измерительных датчиков от магнитной проницаемости μ материала проволок. Она, в свою очередь, зависит от многих факторов: от напряжённости приложенного магнитного поля, магнитной

предыстории материала, механических напряжений, температуры, структуры стали, химических превращений и др. Эти и другие факторы часто присутствуют в процессе НК канатов, вызывая шум на выходе датчиков дефектоскопа. Пример — локальный нагрев или изгиб каната при его эксплуатации.

Для минимизации влияния мешающих факторов применяются различные методы. Так, для уменьшения влияния неоднородности магнитных характеристик материала каната используют магнитное насыщение сильным магнитным полем [8].

Далее приведены некоторые примеры рассмотренных подходов к метрологическому обеспечению магнитной дефектоскопии стальных канатов.

Конструкции канатов и площади их поперечного сечения сильно различаются. Однако спецификации дефектоскопов обычно устанавливаются независимо от этого. Например, порог чувствительности магнитных дефектоскопов часто декларируется как одна оборванная проволока. Но площадь сечения одной проволоки относительно площади сечения каната лежит в пределах (0,9–0,3)% и менее. Некоторые поставщики дефектоскопов заявляют значения порога чувствительности (0,1–0,05)%, чтобы прибор соответствовал требованию к порогу как к одной оборванной проволоке. На практике это невозможно из-за упомянутого шума. Это может оказаться возможным только в случае, когда этот параметр определяется добавлением одной проволоки к канату, неподвижному относительно магнитной головки дефектоскопа, то есть при отсутствии шума. Кроме того, дополнительная проволока размещается на поверхности каната, имитируя наружный дефект. Но если обрыв внутри каната или, особенно, на его оси, сигнал уменьшается. Вот почему следует быть внимательным при оценке порога чувствительности. То же относится и к определению погрешности измерения дефектоскопом площади поперечного сечения каната. Утверждения о выдающихся метрологических параметрах зачастую не более чем рекламный материал.

При НК канатов уровень шума зависит от типа и состояния ОК. Канатам закрытого типа соответствует самый низкий уровень шума, поскольку они, благодаря своей конструкции (рис. 5), обладают гладкой поверхностью.

Одна проволока такого каната имеет довольно большую относительную площадь сечения. Поэтому её обрыв уверенно обнаруживается.



Рис. 5. Канат закрытой конструкции и его сечение



Рис. 6. Канат спиральной конструкции и его сечение



Рис. 7. Канат прядевой конструкции и его сечение

Немного выше (хуже) порог чувствительности при контроле канатов спиральной свивки, имеющих менее гладкую поверхность, чем у канатов закрытого типа (рис. 6).

И самый высокий (наихудший) порог чувствительности соответствует контролю канатов прядевой конструкции, у которых поверхность наименее гладкая из-за прядевой структуры, создающей периодически повторяющиеся вдоль оси каната выступы и впадины (рис. 7). В результате на поверхности возникают соответствующие им поля рассеяния, что создает периодическую составляющую шума на выходе датчиков (рис. 8). Здесь канал потери сечения (ПС) отображает в процентах относительное уменьшение площади поперечного сечения по металлу (из-за износа или коррозии), а канал локальных дефектов (ЛД) — сигналы от обрывов проволок каната в милливольтках. Сопоставление дефектограмм на рис. 8 показывает, что

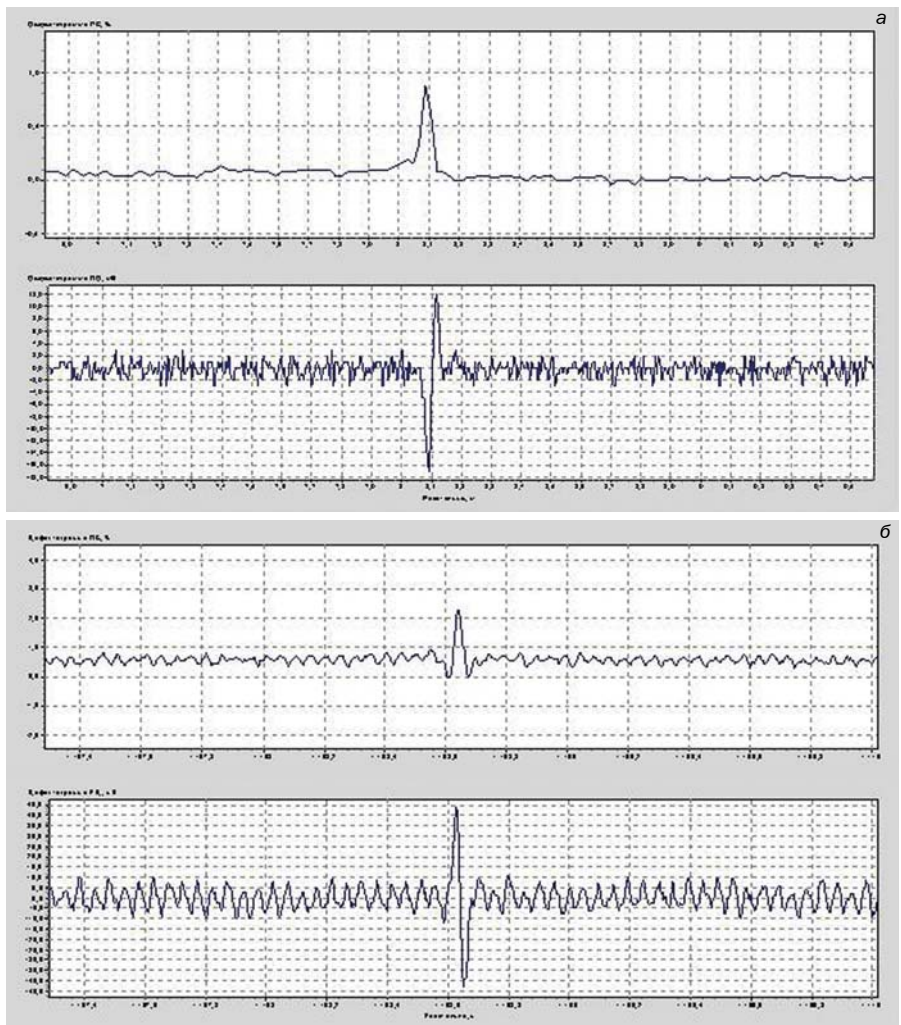


Рис. 8. Дефектограммы магнитного дефектоскопа ИНТРОС по каналам потери сечения (вверху) и локальных дефектов (внизу) для участков каната закрытой (а) и прядевой (б) конструкций

лучшее и худшее значения порога чувствительности могут различаться в несколько раз, что необходимо учитывать в практике НК.

Строго говоря, обнаружить дефект каната можно лишь с определенной вероятностью. Существуют также вероятность пропуска дефекта и вероятность ложного обнаружения (перебраковка). В совокупности все эти параметры определяют достоверность НК. Методики её оценки могут быть различными, что отражено, например, в методических рекомендациях [9]. Такой подход традиционен при внутритрубном НК нефте- и газопроводов. Порог чувствительности, установленный как искусственный дефект минимальных размеров, который может быть обнаружен с вероятностью 0,95, — главный метрологический параметр дефектоскопа. Дефекты различной формы и размеров на внутренней и внешней поверхности трубы сертифицируются метрологической службой. Однако некоторая неопределенность возможна даже в этом случае из-за различий марок стали и технологии производства труб. В частности, уровень шума для горячекатаных труб значительно выше, чем для сварных (прямошовных). Подобный подход применяется и для метрологического обеспечения магнитного НК днищ и стенок стальных резервуаров.

Нормативная база метрологического обеспечения магнитного НК стальных канатов развита, к сожалению, недостаточно. Следует упомянуть три известных регулирующих документа по этим технологиям, касающихся метрологических аспектов.

Методика ASTM [3] включает в себя разделы по:

- контрольным образцам канатов;
- ограничениям применяемой технологии НК;
- используемым приборам;
- процедуре НК.

Следует заметить, что требования этой методики [3] к контрольным образцам канатов дают возможность воспроизвести реальный шум благодаря движению через магнитную головку дефектоскопа замкнутой петли контрольного образца. Конечно, этот шум может отличаться от шума реального объекта контроля, если для контрольного образца использован отрезок каната, параметры которого значительно отличаются от параметров контролируемого каната.

Второй нормативный документ — европейский стандарт по безопасно-

сти канатных дорог [10]. Он содержит требования к процедуре контроля и её верификации, включая испытания в рабочих условиях. Эти испытания также основаны на применении контрольных образцов. Характеристики образцов описаны не так подробно, как в методике ASTM, но зато в стандарте приведена процедура проверки разрешающей способности (минимального расстояния между двумя последовательными обрывами проволоки, при котором они обнаруживаются раздельно) дефектоскопа. Эта процедура включает в себя оценку отношения сигнал/шум и методики оценки шума. Рис. 9 иллюстрирует этот подход.

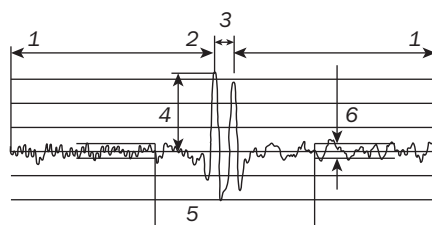


Рис. 9. Оценка дефектограммы канала потери сечения согласно EN 12927-8: 1 — 2 м от конца каната, или 40d; 2 — два обрыва проволоки; 3 — s (макс. 50 мм); 4 — наибольшее значение сигнала, амплитуда которого не менее чем вдвое превышает огибающую; 5 — 200 мм не должны учитываться (относится к огибающей); 6 — огибающая (см. рис. 8б)

Уровень шума характеризуется как «огибающая» — «расстояние между двумя отрезками параллельных прямых длиной не менее 25d с каждой стороны обрыва проволоки, расположенных так, что всего не более пяти выбросов дефектограммы пересекают эти параллельные отрезки». Здесь d — номинальный диаметр каната, s — расстояние между обрывами.

Третий нормативный документ — методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов Госгортехнадзора РФ [2]. Он содержит требования к дефектоскопам канатов, а также детальные инструкции по: процедуре НК; контрольным образцам; обработке и интерпретации данных, полученных при контроле. Требования документа обязательны для владельцев подъемных сооружений и подъемных машин, таких как шахтные подъемы, подъемные краны, лифты, подвесные канатные дороги, фуникулеры, и для организаций, осуществляющих обследование подъемных сооружений. В отличие от этого, требования методики ASTM имеют рекомендательный характер, однако обычно выполняются на практике, особенно в США. То же относится

и к Еuronorme EN 12927-8: 2004, требования которой соблюдаются добровольно владельцами канатных дорог, и не только в Европе.

Следует отметить, что эти три документа имеют много общего, однако есть и различия. В них учтен многолетний опыт применения магнитного НК канатов в разных странах, они написаны понятно и грамотно и вполне выполнимы. В то же время документы [2] и [10] не пересматривались уже более десяти лет и не полностью отражают возможности современных технологий магнитного НК. Было бы целесообразно разработать стандарт или другой нормативный документ (например, Руководство по безопасности эксплуатации канатов Ростехнадзора) на основе действующих национальных и международных норм, учитывающий прогресс в этой области.

Все три упомянутых нормативных документа включают в себя требования к инспекционному персоналу. Устанавливаются два уровня квалификации персонала. Лицо первого уровня «облечено правом выполнять операции магнитного контроля каната согласно письменным инструкциям и под наблюдением персонала второго уровня» [3]. Лицо второго уровня «облечено правом выполнять НК и управлять им согласно установленным и общепризнанным процедурам». Только оно компетентно интерпретировать и оценивать результаты, «понимать стандарты и спецификации магнитного контроля канатов и преобразовывать их в практические инструкции по контролю, адаптированные к действительным рабочим условиям», калибровать оборудование и т. д. Таким образом, предполагается, что персонал, привлекаемый к магнитному контролю канатов, достаточно квалифицирован и понимает разницу между параметрами применяемого прибора и параметрами НК, зависящими от реальных рабочих условий. К сожалению, это не всегда факт. В частности, непонимание этой разницы довольно часто встречается, если НК используется компаниями для инспекции собственных объектов.

Подготовка персонала по магнитному контролю канатов обеспечивается производителями (поставщиками) соответствующих приборов. Российская компания ООО «ИНТРОН ПЛЮС» много лет готовит и аттестует персонал по магнитному НК канатов в соответствии с нормами [2]. Для этого используются приборы ИНТРОС, разработанные и выпускаемые этой компанией. Лицо, про-

шедшее аттестацию, должно проходить переподготовку и переаттестацию каждые 3 года. Благодаря этому компания может контролировать уровень квалификации персонала и правильность использования прибора.

Заключение

Метрология в НК довольно специфична из-за того, что измерения и оценка параметров контролируемого объекта имеют непрямой характер и их результаты зависят от характеристик объекта и условий контроля. Значения метрологических параметров прибора, специфицированные его производителем, действительны только в определенных условиях и не могут переноситься напрямую в большинстве случаев практики НК. Необходимо учитывать влияние различных помех, поскольку влияющие факторы создают реальный шум при контроле. Значения метрологических параметров (технологические) реально-го НК объекта обычно хуже, чем инструментальные. Это особенно важно при магнитном и электромагнитном НК ферромагнитных объектов из-за сильного влияния условий контроля, магнитных характеристик объекта и нелинейной зависимости магнитной проницаемости его материала от напряженности возбуждающего магнитного поля.

Стандарты и другие нормативные документы, регулирующие применение магнитных методов для НК стальных канатов, помогают пользователям правильно применять эти технологии. Однако требуется отражать в документах дальнейший прогресс в этой области.

Правильная и своевременная подготовка персонала позволяет более корректно обеспечивать оценку метрологических параметров при использовании технологий НК.

Литература

1. Сухоруков В.В., Вайнберг Э.И., Кажис Р.-Й. Ю., Абакумов А.А. Интроскопия и автоматизация неразрушающего контроля. — В кн.: Неразрушающий контроль/Практ. Пособие/под ред. В.В. Сухорукова. Кн. 5.: — М.: Высш. шк., 1993. — 329 с.
2. РД 03-348-00. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов грузоподъемных кранов. — В кн.: ПБ 10-382-00. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов/Сб. документов, сер. 10, вып. 7. — М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2009, с. 264–283.
3. ASTM, ASTM E 1571–11: Standard Practice for Electromagnetic Examination of Ferromagnetic Steel Wire Rope, ASTM Book of Standards, V. 03.03. — West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM Int., 2011.
4. Гронау О., Руссолд А., Белицкий С.Б. и др. Документирование и интерпретация результатов дефектоскопии канатов в России и за рубежом. — В мире НК. 2006. № 2. С. 25–29.
5. Sukhorukov V.V. MFL Technology for Diagnostics and Prediction of Object Condition. — In: The 12th Int. Conf. of the Slovenian Soc. for NDT. — Portoroz, Slovenia: Sept. 4–6, pp. 389–402.
6. Сухоруков Д.В., Слесарев Д.А., Абакумов А.А. (мл.), Поляхов М.Ю. Технология диагностики днищ и стенок стальных вертикальных резервуаров с применением сканирующих магнитных дефектоскопов высокого разрешения. — Сфера Нефтегаз. 2010. № 2. С. 50–55.
7. Slessarev D., Sukhorukov V., Belitsky S. et al. Magnetic in-line inspection of pipelines: Some problems of direct detection, identification and measurement. — In: 9th ECNDT/Abstracts. — Berlin: ECNDT, 2006, p. Tu.3.1.2. (Полный текст: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.1.2.pdf>).
8. Sukhorukov V. Magnetic Flux Leakage Testing Method: Strong or Weak Magnetization? — Materials Evaluation. 2013, v. 71, No. 5. P. 27–31.
9. Руководящий документ «РД ЭО 0488–03. Методические рекомендации по оценке достоверности средств и методик неразрушающего контроля. — М.: ФГП Концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ», 2003. — 34 с.
10. EN 12927–8: 2004. Safety requirements for cableway installations designed to carry persons — Ropes — Pt 8: Magnetic rope testing (MRT).

References

1. Sukhorukov V.V., Vainberg E.I., Kazhis R.-Y. Yu., Abakumov A.A. Introskopiya i avtomatizatsiya nerazrushayushchego kontrolya [Introscopy and automation of nondestructive testing]. In: *Nerazrushayushchiy kontrol* [Nondestructive testing: Practical guide, part 5]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1993, 329 p. (in Russ.).
2. RD 03–348–00. Metodicheskie ukazaniya po magnitnoy defektoskopii stalnykh kanatov gruzopod'emnykh kranov [Guidelines for magnetic flaw detection of hoisting crane steel wire ropes]. In: *PB 10–382–00. Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii gruzopod'emnykh kranov* [Rules for arrangement and safety operation of hoisting cranes: ser. 10, iss. 7]. Moscow, «Promyshlennaya bezopasnost'» Publ., 2009, pp. 264–283 (in Russ.).
3. ASTM, ASTM E 1571–11: Standard Practice for Electromagnetic Examination of Ferromagnetic Steel Wire Rope. ASTM Book of Standards, V. 03.03. West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM Int., 2011.
4. Gronau O., Russold A., Belitskiy S.B. et al. *V mire NK* [NDT World]. 2006, no. 2, pp. 25–29 (in Russ.).
5. Sukhorukov V.V. MFL Technology for Diagnostics and Prediction of Object Condition. In: *The 12th Int. Conf. of the Slovenian Soc. for NDT*. Portoroz, Slovenia: Sept. 4–6, pp. 389–402.
6. Sukhorukov D.V., Slesarev D.A., Abakumov A.A. (Jr.), Polyakhov M.Yu. *Sfera Neftegaz* [Oil and Gas Area], 2010, no. 2, pp. 50–55 (in Russ.).
7. Slessarev D., Sukhorukov V., Belitsky S. et al. Magnetic in-line inspection of pipelines: Some problems of direct detection, identification and measurement. In: *9th ECNDT Abstracts. Berlin, ECNDT, 2006*, p. Tu.3.1.2. (Full text: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.1.2.pdf>).
8. Sukhorukov V. Magnetic Flux Leakage Testing Method: Strong or Weak Magnetization? — *Materials Evaluation*. 2013, v. 71, no. 5, pp. 27–31.
9. *RD EO 0488–03. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke dostovernosti sredstv i metodik nerazrushayushchego kontrolya* [Methodical recommendations on reliability assessment of NDT means and techniques]. Moscow, Rosenergoatom, 2003, 34 p.
10. *EN 12927–8: 2004. Safety requirements for cableway installations designed to carry persons. Ropes. Magnetic rope testing (MRT)*.

Статья получена 9 сентября 2015 г., в окончательной редакции — 22 сентября



В. Н. Данилов, Л. В. Воронкова. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ФАЗИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ

М: Издательский дом «Спектр», 2015. — 156 с.

Изложены особенности работы преобразователей с фазированными решетками. На примере методик контроля объектов атомной энергетики показаны возможности и ограничения в определении параметров выявляемых отражателей.

Для разработчиков аппаратуры и методик контроля, повышения квалификации специалистов по акустическому методу контроля, студентов и аспирантов соответствующей специальности.

Книгу можно приобрести в ООО «Издательский дом «Спектр»:
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1
Телефон отдела реализации: (495) 514-26-34,
e-mail: zakaz@idspektr.ru
www.idspektr.ru