

3. ДИАГНОСТИКА ОБЪЕКТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

УДК 622.692.4

ОПЫТ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВНУТРИТРУБНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В СТЕНКЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

А.А. Долгий¹, И.М. Блакунов², Н.А. Гейдан¹, С.П. Пантелеймонов¹

¹ООО «LatRosTrans», Даугавпилс, Латвия,

²NGKS, Москва, Россия

Представлены практические результаты применения специализированного внутритрубного детектора для обнаружения сквозных отверстий в стенке магистрального трубопровода. Целесообразность его применения диктуется в настоящее время низкой эффективностью использования других, отличных от внутритрубных, методов обнаружения сквозных отверстий в стенке магистрального трубопровода и связана как с необходимостью сохранения режима безопасной эксплуатации трубопровода, так и с минимизацией потерь перекачиваемого продукта.

Введение. Известные способы обнаружения сквозных отверстий (СО), например, по падениям внутритрубных давлений или скорости их изменений, не всегда позволяют с достаточной для практики точностью определить их местоположение. Причиной этого является как ограничения упомянутых методов, так и высокие уровни акустических шумов давлений, создаваемых насосными агрегатами.

В настоящее время пока нет альтернативы использованию известных ВИП для решения поставленной задачи. Однако их регулярное применение экономически не выгодно. Представляет интерес один из упрощенных вариантов ВИП, который назовем ДСО. Он выполняет одну узкую задачу – обнаружение СО стенки магистрального трубопровода (МТ). Технология применения ДСО состоит из известных процедур подготовки внутренней поверхности МТ, записи сигналов при его прогоне и обработке получен-

ных данных. В результате их обработки необходимо фиксировать сквозные отверстия стенки МТ.

Особенность рассматриваемой технологии применения ДСО связана не только с ограничениями, которые накладываются на его технические параметры, но и с особенностями устройства и эксплуатации МТ. Это прежде всего наличие или отсутствие в его составе бесшовных, так называемых «чешских» труб. Что, как известно, затрудняет процесс достоверного программного обнаружения сквозных отверстий стенки МТ за счет маскирования сигналов от них шумами, которые порождаются особенностями проката таких труб [1].

Опыт обработки данных ДСО. Опыт обработки данных обнаружения сквозных отверстий стенки МТ нами рассматривается на практическом примере использования ДСО, который имеется в распоряжении ООО «LatRosTrans». Обработке подвергались записи «сырых» (исходных) сигналов от сквозных отверстий, полученных при прогонах детектора по МНПП: Дисна – Вентспилс в 2005...2007 годах на участках Дисна – Илуксте (длина 146 км); Илуксте – Джуксте (длина 230 км); Джуксте – Вентспилс (длина 130 км).

1. Примеры автоматической программной обработки

1.1. Нормировка сигналов ДСО. Характеристики датчиков характеризуются разбросом, т.е. при прохождении над одним и тем же дефектом их амплитуды отличаются. Это затрудняет дальнейшую обработку. Поэтому производится их нормировка над массивами транслированных блоков данных размерностью $N \times M$, где N – количество датчиков, а M – количество значений амплитуды сигнала по каждому датчику.

Нормированное значение $Z_{i,j}$ определяется по формуле:

$$\bar{Z}_{i,j} = \frac{2 \cdot (Z_{i,j} - S_i)}{K_i},$$

где i – номер датчика ($i = 1 \dots N$); j – номер скана относительно начала файла ($j = 1 \dots M$); $Z_{i,j}$ – исходное значение амплитуды сигнала i -того датчика на j -том скане; S_i – среднее значение амплитуды сигнала i -того датчика на рассматриваемом участке; K_i – калибровочный коэффициент i -того датчика (размах сигнала).

Несложно видеть, что после нормировки преобладающая часть сигналов будет находиться в интервале $\{-1 \dots +1\}$.

1.2. 2-D-Фильтрация. Типичные сигналы ДСО обладают высоким контрастом (отношением сигнал/шум) на прямошовных трубах и низким – на бесшовных (рис. 1).

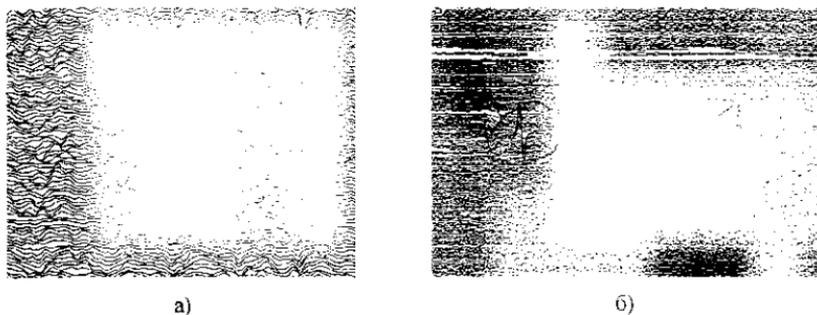


Рис. 1. Пример записи сигналов на бесшовных и прямошовных секциях:
а – Бесшовная секция; б – прямошовная секция

Предварительно оценена «частотная» различимость сигналов «проката» и СО с использованием двумерных амплитудных спектров мощности (рис. 2), построенных путем БПФ:

$$S_n = |X_i(\omega, \omega_2)| = 10 \cdot \log(\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}_2}).$$

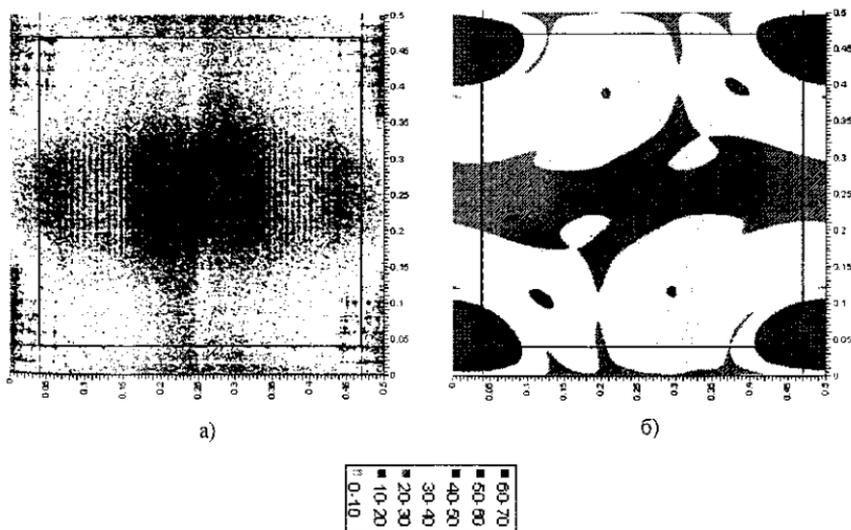


Рис. 2. Спектральные плотности мощности ($10 \cdot \log(S_n)$) «проката» и СО:
а – накатка; б – сквозное отверстие

Область черного прямоугольника, выделенного черным цветом, определяет полосу пропускания двумерного фильтра.

На рисунках 3 и 4 показаны результаты фильтрации сигналов от бесшовной секции; на рисунке 5 – подавление сигналов с малой относительной амплитудой ($< 0,3$) и усиление сигналов с большой относительной амплитудой ($> 0,3$); на рисунке 6 – аналогичные операции с сигналами от прямошовной секции.

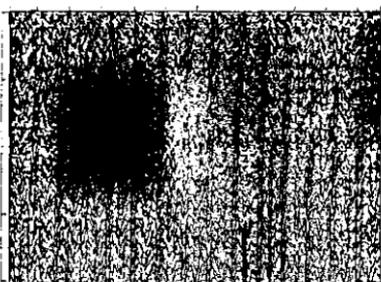


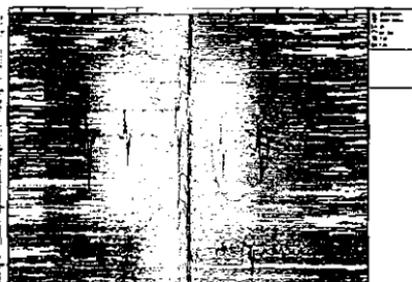
Рис. 3. Исходный сигнал



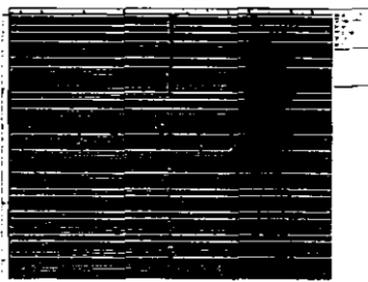
Рис. 4. Сигнал после 2-D-фильтрации



Рис. 5. Результат подавления сигналов с малой амплитудой



а)



б)

Рис. 6. Сигналы ДСО до фильтрации (а) и после фильтрации (б)

1.3. Корреляционный анализ. Подобие аномальных зон сквозным отверстиям оценивается по коэффициенту корреляции с шаблонами (сигналами, полученными на протяжке по стенду).

Расчет коэффициента корреляции выполнен по формуле:

$$\rho_{12} = \frac{\max(r_{12}(i, j))}{|X_1(0, 0)| |X_2(0, 0)|}$$

Здесь $X_1(0, 0)$ и $X_2(0, 0)$ – элементы ДПФ последовательности при $k_1 = 0$ и $k_2 = 0$.

Если коэффициент корреляции аномальной зоны превышает пороговое значение, то производится запись аномальной зоны в базу данных совместно с информацией об относительной амплитуде, количестве обработанных каналов, дистанции, углового положения.

1.4. Условная вероятность классификации сигналов. Для повышения достоверности классификации особенностей использовалась априорная информация об условной вероятности отнесения аномальной зоны к сквозному отверстию по следующим признакам: количество датчиков, зафиксировавших особенность, относительная амплитуда сигнала, коэффициент корреляции с шаблоном, угловое положение.

Для каждого признака проводилась обработка с целью получения условной вероятности нахождения отверстия $P_{i,j}(A/H_{i,j})$, где i – номер параметра; j – значения или часть диапазона возможных значений i -того параметра. Использована формула:

$$P_{i,j}(A/H_{i,j}) = n_{ij}/N_{ij}$$

Здесь N_j – число найденных в результате автопоиска особенностей, у которых i -тый параметр принимает j -тое значение, а n_j – количество совместившихся с особенностями типа трубная арматура, у которых i -тый параметр принимает j -тое значение.

На рисунке 7 графически показаны упомянутые условные вероятности, рассчитанные по результатам автопоиска на 230 км участке и априорной информации о сквозных отверстиях.

В качестве комбинированного критерия используется расчетная условная вероятность при некотором наборе решающих параметров, т.е. для каждой найденной особенности в соответствии со значениями параметров находятся условные вероятности P_i . Тогда результат имеет вид:

$$P(A/H_{\Sigma}) = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_i)$$

Чем выше P , тем более вероятно, что аномальная зона является сквозным отверстием.

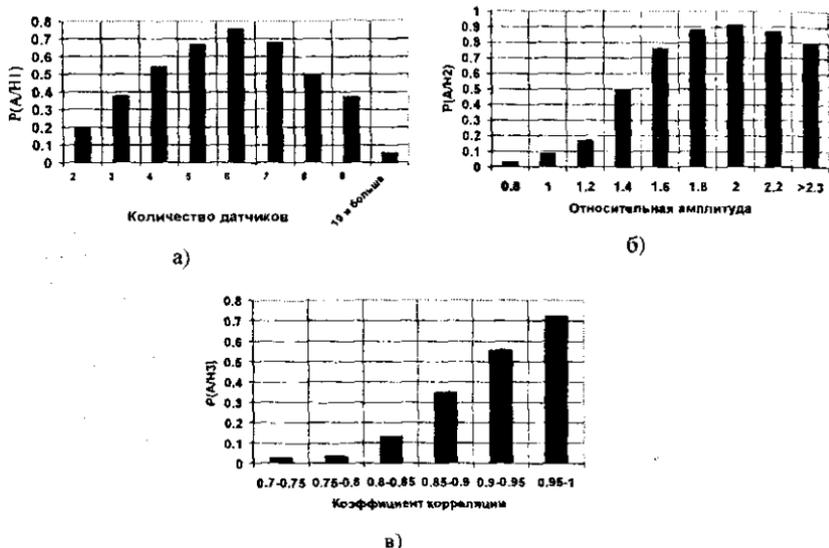


Рис. 7. Условные вероятности:
а – по количеству датчиков; б – по относительной амплитуде;
в – по коэффициенту корреляции

2. Перечень процедур ручной программной обработки

Рассмотренные выше алгоритмы обработки сигналов использованы для автоматического анализа данных, записанных на всей длине МТ. Однако практика обработки данных показала, что часто возникает необходимость детального анализа сигналов, полученных с одной секции МНПП, т.е. так называемая прецизионная обработка. Для этих целей используется набор программных процедур, описанных ниже.

2.1. Вычитание среднего (ВС) предназначено для центрирования обрабатываемого ансамбля трасс.

2.2. Преобразования Гильберта использовано для получения огибающей трассы и подчеркивания «сильных» сигналов.

2.3. Предсказывающая деконволюция выполняется с целью подавления регулярных помех и повышения разрешающей способности системы обработки.

Регистрируемый сигнал (трасса) рассматривается в рамках линейной модели, описываемой интегралом свертки. Частотная характеристика этой сложной системы представляет собой произведение характеристик приемно-регистрирующего тракта и частотной характеристики среды. В нее входят искажения, связанные со средой, но являющиеся по существу помехами при интерпретации результатов наблюдений. Соответственно, в процессе деконволюции рассчитывается оператор линейного фильтра для подавления указанных искажений. При этом используется алгоритм Винера – Левинсона для решения уравнения Винера – Хопфа в присутствии белого шума с минимизацией ошибки предсказания методом наименьших квадратов.

2.4. 2-D-Пространственная фильтрация реализует различные типы двумерных пространственных фильтров. Мы использовали следующие три алгоритма: скользящее усреднение, скользящее усреднение с исключением и медианный фильтр.

2.5. F-K-Миграция Столта используется для увеличения отношения сигнал/шум и горизонтальной разрешающей способности системы обработки сигналов.

Миграционное преобразование позволяет восстановить форму сигнала от СО и очистить профиль от помех, порождаемых при записи сигналов от неплоских границ внутренней стенки трубы (так называемая «накатка» или «прокат»). Суть одной из них состоит в суммировании трасс с соответствующими временными задержками, что позволяет свернуть упомянутые помехи примерно в точку.

Другой процедурой является F-K-миграция Столта, которая достаточно подробно описана в литературе.

2.6. Полосовая фильтрация использована для выделения в частотном спектре трасс полосы частот с высоким соотношением сигнал/помеха.

Линейная одномерная фильтрация производится в частотной области умножением Фурье-образа трассы на частотную характеристику цифрового фильтра. Предусмотрены три типа полосовых фильтров: трапециевидный, косинусный и фильтр Баттеруорта. Для первых двух фильтров задаются 4 значения угловых частот. Для фильтра Баттеруорта – 2 значения граничных частот и 2 величины крутизны. Режекторный фильтр задан трапециевидным, и для него также задаются 4 значения угловых частот. Фильтр Баттеруорта минимальнофазовый, все остальные фильтры нульфазовые.

Для Фильтра Баттеруорта вводится в соответствующих окнах набор параметров частота-крутизна-частота-крутизна.

2.7. Амплитудная коррекция (регулировка усиления) включала в себя линейную, экспоненциальную и автоматическую регулировку усиления сигналов.

Выводы

1. На наш взгляд, предлагаемый перечень процедур обработки данных ДСО в настоящее время повышает эффективность обнаружения сквозных отверстий стенки МТ, что приводит к увеличению уровня безопасной эксплуатации МТ, а также к снижению потерь перекачиваемого продукта.

2. Регулярные прогоны ДСО позволили выявить и исключить из анализа другие особенности стенки трубопровода, которые по форме сигналов аналогичны сквозным отверстиям, но таковыми не являются. К ним относятся такие особенности стенки, как внутренние «потери металла стенки», ремонтные конструкции типа «чоп» и т.д.

3. Упомянутые процедуры повторялись на протяжении 3-х лет с целью определить устойчивую пространственную корреляцию данных, полученных от разных прогонов. Они позволили производить мониторинг изменений наличия сквозных отверстий стенки МТ на текущем прогоне по сравнению с предыдущими прогонами, что сократило время анализа данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгий, А.А. Пример выделения сигнала из помех в процессе анализа результатов внутритрубного обследования металла магистральных трубопроводов / А.А. Долгий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lrt.lv>.

УДК 620.179.111

О ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ПОВЕРХНОСТНОЙ СПЛОШНОСТИ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ, С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Н.П. Мигун¹, А.Б. Гнусин¹, И.В. Волович²

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь,

²ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод», Мозырь, Беларусь

Проанализированы проблемы, ограничивающие возможности применения методов контроля проникающими веществами для дефектоскопии сложных технических объектов, имеющих высокую шероховатость диагностируемых поверхностей, и пути их решения. Сделан вывод о необходимости привлечения компьютеризированной количественной цифровой оценки

видеоизображений, а также методов и средств снижения шероховатости при использовании капиллярной дефектоскопии для проведения мониторинга поверхностной сплошности сосудов, работающих под давлением. Предложена методика такого мониторинга методами капиллярной дефектоскопии.

Как известно, мониторинг – это специально организованное, систематическое наблюдение за состоянием объектов, явлений, процессов с целью их оценки, контроля или прогноза.

Цель мониторинга – как можно более раннее определение опасного отклонения или аварийного состояния отдельных узлов и объектов в целом, идентификация источника опасности и передача информации об этом в соответствующий орган структуры обеспечения безопасности функционирования технической системы для нормализации режима ее работы.

Мониторинг безопасности технологических процессов, как правило, представляет собой процедуру получения информации в *реальном (on-line) масштабе времени* о состоянии технологических процессов и объектов в целом. Некоторые методы неразрушающего контроля, как, например, акустико-эмиссионный метод, эффективно применяются для *on-line* мониторинга потенциально опасных промышленных объектов. В то же время методы контроля проникающими веществами, позволяющие выявлять поверхностные микротрещины шириной раскрытия в десятые доли микрометра, что было бы особенно важно при их применении для ранней диагностики сосудов под давлением и трубопроводов пока, к сожалению, не применяются для мониторинга технического состояния таких объектов. Среди причин основными являются следующие:

1) капиллярный контроль – это технологически многооперационный процесс, который во многих случаях, как например, при контроле стационарных объектов типа резервуаров, трубопроводов и т.п., очень сложно автоматизировать, что было бы необходимо для *on-line* мониторинга;

2) сравнение технического состояния объекта в различные моменты времени требует строгого соблюдения идентичности условий воздействия на объект и обязательной *количественной* оценки результатов этого сравнения. Следовательно, необходимо решить проблему количественной оценки как степени идентичности процедуры капиллярного контроля в разные моменты времени, так и самих результатов контроля;

3) неприменимость существующих сегодня методов и средств капиллярной дефектоскопии для выявления дефектов в изделиях с высокой шероховатостью поверхностей (многие сварные швы, грубо обработанные поверхности и т.п.).

Первую из перечисленных проблем предлагается обойти следующим образом. Если диагностируемый объект уже включен в систему *on-line* мониторинга, то можно просто дополнять получаемые другими методами в автоматическом режиме результаты, организовав ручной периодический капиллярный контроль особо ответственных участков объекта. Фактически это означает совмещение *on-line* и обычного мониторинга с целью получения более информативного банка данных о техническом состоянии объекта. В отсутствие же системы *on-line* мониторинга весьма эффективным является соответствующим образом организованный обычный мониторинг с применением средств количественной оценки результатов капиллярного контроля на основе систем технического зрения.

Проблема объективной количественной оценки результатов капиллярного контроля решается с помощью применения разработанных нами компьютеризированной установки и соответствующего программного обеспечения для обработки и анализа видеоизображений дефектов [1]. В качестве устройства, регистрирующего результаты контроля качества дефектоскопических материалов, используемых при мониторинге, применяется телевизионная система, позволяющая обнаруживать и автоматически регистрировать малые по размеру и слабоконтрастные индикаторные рисунки дефектов. Достоинством такой установки является возможность проведения быстрой, надежной и объективной оценки качества наборов дефектоскопических материалов. Для мониторинга контролируемых участков сосудов под давлением удобно использовать соответствующим образом подобранную цифровую фотокамеру.

Разработанные нами алгоритмы и программное обеспечение позволяют оперативно определять не только значения геометрических и яркостных характеристик индикаторных рисунков дефектов, но и различимость последних на том или ином фоне, в том числе и при неоднородном по яркости фоне. При этом все данные автоматически документируются, что особенно важно для проведения мониторинга. Особую значимость имеет объективность оценки, основанная на четко определенных количественных критериях. Очевидно, что в отсутствие надежной количественной сравнительной оценки обработанных с применением капиллярной дефектоскопии одних и тех же контролируемых участков, обследованных в различные моменты времени, мониторинг поверхностной сплошности сосудов, работающих под давлением, не будет достаточно надежным и эффективным. Кроме того, разработанные нами средства значительно упрощают определение оптимальных характеристик режимов стадий контроля (предварительная очистка, нанесение и последующее удаление пенетранта, нанесение проявителя) и условий освещенности, при которых обеспечивают

ся требования максимальной степени идентичности процедур проведения всех стадий в заданные дни при проведении мониторинга. Подбор таких значений характеристик технологических стадий контроля в отсутствие средств, обеспечивающих их объективную количественную оценку, требует значительно (на порядок и выше) больших трудозатрат. Например, нами разработана методика контроля при оптимальных режимах всех технологических этапов капиллярного контроля, при использовании которой обеспечивается максимальная выявляемость дефектов в контролируемых изделиях. При этом установлены оптимальные значения исследованных характеристик различных стадий контроля для ряда широко используемых дефектоскопических наборов [2].

Преодолению третьей из перечисленных выше трудностей – неприменимости существующих сегодня методов и средств капиллярной дефектоскопии для выявления дефектов в изделиях с высокой шероховатостью поверхностей, каковыми зачастую являются сварные швы сосудов и трубопроводов, уделяется сегодня особое внимание при проведении научных исследований в ИПФ НАН Беларуси. Эти исследования проводятся в институте по двум основным направлениям:

- первое – это разработка таких методов и средств обработки контролируемых поверхностей, применение которых обеспечивает снижение шероховатости до требуемых значений без закрытия (зашлифовки) устьев поверхностных дефектов. Эти уже разработанные недавно в институте методы и средства использованы нами в предлагаемой ниже методике мониторинга методами капиллярной дефектоскопии поверхностной сплошности сосудов, работающих под давлением;

- в рамках второго направления разрабатываются новые алгоритмы анализа видеозображений индикаторных следов дефектов, позволяющие учесть неоднородность яркости фона, а также отфильтровать ложные индикации, вызванные образованием микрорельефа поверхности с определенной угловой ориентацией вследствие предварительной абразивной обработки контролируемой поверхности.

Рассмотрим более подробно разработанную нами методику мониторинга методами капиллярной дефектоскопии поверхностной сплошности сосудов, работающих под давлением.

Основные положения методики

Методика мониторинга поверхностной сплошности сосудов, работающих под давлением, применима для использования наборов дефектоскопических материалов при проведении как цветного, так и люминесцентного капиллярного контроля.

Количественная оценка результатов капиллярного контроля основана на цифровой регистрации получаемых видеоизображений анализируемых участков поверхности, обработке регистрируемого изображения, локализации на изображении индикаторных рисунков выявленных дефектов, анализе и расчете геометрических и оптических характеристик изображений индикаторных рисунков, определяющих выявляемость дефектов, имеющих на объекте контроля.

Выявляемость дефектов либо оценка изменения их размеров во времени при мониторинге оценивается на основании вычисления значения светового потока, комплексно учитывающего геометрические и оптические характеристики индикаторных рисунков, которые характеризуют их видимость.

Методика определяет порядок проведения регистрации и анализа результатов капиллярного контроля, а также требования к режимам технологических операций капиллярного контроля.

Технические средства. В качестве устройства, регистрирующего результаты контроля, используется цифровая фотокамера с соответствующим разрешением. Компьютерный анализ полученных видеоизображений контролируемых участков диагностируемых поверхностей осуществляется с помощью специального программного обеспечения, отличительной чертой которого является учет ряда особенностей гистограммы распределения яркости точек анализируемого изображения. Кроме того, используются заданные наборы дефектоскопических материалов и источники освещения (УФ-лампа, лампа дневного света). Важными элементами технических средств, обязательными для реализации мониторинга, являются также люксметр и измеритель интенсивности УФ-освещенности, которые позволяют обеспечить идентичность условий освещения одних и тех же контролируемых участков в различные дни в процессе мониторинга.

Подготовка диагностируемой поверхности. Как известно, высокая шероховатость поверхности является препятствием для проведения капиллярного контроля. Значения шероховатости поверхности, при которой капиллярный контроль неприменим вследствие образования фона, мешающего регистрации и оценке индикаций дефектов, зависят как от типа пенетранта, так и от предъявляемых к диагностируемым техническим объектам требований к безопасности их функционирования.

В рамках предлагаемой нами методики мониторинга оператор-дефектоскопист должен провести визуальный осмотр контролируемой поверхности и ее пробную обработку дефектоскопическими материалами с целью оценки влияния шероховатости на величину мешающего фона, ко-

торый может появиться в результате невозможности полного удаления излишков пенетранта перед нанесением проявителя.

В случае неприемлемо высокой шероховатости необходима обработка контролируемого участка поверхности, применение которой обеспечивает снижение шероховатости до требуемых значений без закрытия (зашлифовки) устьев поверхностных дефектов. При этом рекомендуется использовать разработанные в ИПФ НАН Беларуси методы и средства обработки контролируемых поверхностей [3].

Обычно очистка таких поверхностей выполняется путем их абразивной обработки с использованием зачистных кругов с крупной зернистостью и ручных электрических шлифовальных машинок. Более эффективен, как показали проведенные в ИПФ НАН Беларуси исследования, процесс высокоинтенсивной обработки – высокоскоростное фрезерование бор-фрезами с использованием ручных электрических машинок. Поскольку при такой механической обработке возможные поверхностные дефекты зашлифовываются, то, как правило, необходима последующая электрохимическая обработка (ЭХО) этой поверхности. Конкретные режимы ЭХО, зависящие от марки металла и режимов механической обработки, должны определяться экспериментально в каждом конкретном случае для включения их характеристик в методику.

Подготовив диагностируемую поверхность (очистив ее от загрязнений и, при необходимости, снизив на первом этапе мониторинга ее шероховатость одним из рекомендуемых выше способов), оператор-дефектоскопист должен во время всех последующих этапов процесса мониторинга обеспечить такое состояние фона поверхности перед нанесением проявителя, которое соответствует значению его светового потока на первом этапе.

Процедура фотосъемки контролируемых участков. Способы проведения основных технологических операций капиллярного контроля и их режимы при обработке контролируемых участков в течение всего периода мониторинга должны быть идентичными. В течение всего периода мониторинга (месяц, год, два или более) должны использоваться одни и те же наборы дефектоскопических материалов.

Требуемая идентичность обработки контроля достигается при соблюдении заданной технологической последовательности операций и постоянстве характеристик всех стадий как подготовки контролируемого участка поверхности, так и самого контроля и обеспечении подсветки рабочего пространства видимым светом всегда при одних и тех же значениях освещенности (но не более 10 лк для люминесцентного метода) и ультрафиолетовой облученности контролируемой поверхности.

Анализ и оценка изображений компьютеризированной системой. Регистрация контролируемой поверхности объекта осуществляется поэтапно с такой периодичностью, которая обеспечивает надежную характеристику динамики развития потенциальных дефектов (например, один раз в неделю). Обработка и анализ изображения контролируемой поверхности и оценка характеристик локализованных изображений индикаторных рисунков выявленных дефектов осуществляется соответствующей программой, разработанной в институте.

Результатами оценки являются следующие показатели, рассчитываемые с помощью этой программы:

- площадь изображений индикаторных рисунков дефектов (в пикселях);
- коэффициент выявляемости индикаторных рисунков дефектов.

Изображения, полученные в ходе обработки и анализа контролируемого участка поверхности объекта, должны быть сохранены на соответствующем носителе. При существенном увеличении на очередном этапе мониторинга светового потока от индикации (каждая процедура обработки участка поверхности проводится не менее 3-х раз и оценивается среднее значение из нескольких измерений) необходимо принятие срочных мер по устранению дефекта.

Заключение. Применение описанных новых средств количественной оценки результатов капиллярной дефектоскопии для мониторинга поверхностной сплошности сосудов, работающих под давлением, открывают возможность существенного повышения его эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигун, Н.П. Новые средства определения чувствительности дефектоскопических материалов для капиллярного контроля / Н.П. Мигун, А.Б. Гнусин, Н.В. Деленковский // Метрология и приборостроение. – 2007. – № 2. – С. 16 – 19.
2. New potentials of penetrant testing / N.P Migoun [et al.] // Proceedings of 9th European Conference on NDT. – Berlin, Germany, 2006. – 7 p., CD.
3. Деленковский, Н.В. Электрохимическая обработка сварных швов перед капиллярным контролем / Н.В. Деленковский // Дефектоскопия. – № 5. – 2007. – С. 93 – 97.

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ И ИЗДЕЛИЙ С НИЗКИМ КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

А.В. Рабцевич, О.В. Мацулевич, В.А. Рудницкий

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Традиционные динамические твердомеры позволяют контролировать изделия с толщиной стенки от 10...12 мм и с шероховатостью Ra 1,6...2,5. Рассмотрены методики, позволяющие расширить возможности динамических твердомеров для контроля твердости стальных изделий с толщиной стенки от 5,5 мм или с шероховатостью Ra4-5. Методики реализованы в приборе Импульс-2М и основаны на регистрации всего процесса внедрения индентора в металл изделия.

В настоящее время широкое распространение получили приборы контроля твердости динамического (ударного) действия. Динамические твердомеры портативны, легки в использовании, точны и предоставляют возможность контроля крупногабаритных изделий.

Принцип действия динамических твердомеров основан на нанесении удара индентором (бойком) с малой кинетической энергией по поверхности контролируемого изделия. Индентор имеет высокую твердость и при внедрении в изделие вызывает упругопластическое деформирование металла. На активном этапе удара индентор движется, замедляясь, внутрь металла изделия. После остановки индентор начинает движение наружу под действием сил упругости в отпечатке (пассивный этап удара). Разница между кинетическими энергиями индентора до и после соударения есть потери энергии на пластическую деформацию в отпечатке. В предлагаемых на рынке твердомерах регистрируется скорость отскока индентора либо скорость полета и скорость отскока. Коэффициент восстановления скорости, определяемый как отношение скорости отскока к скорости полета, есть мера твердости изделия (твердость по Шору). Наличие устойчивой связи между статической твердостью металлов (Бринеля, Роквелла) и коэффициентом восстановления скорости позволяет калибровать динамические твердомеры непосредственно в единицах статической твердости.

Приборы измерения твердости динамического действия не лишены ряда недостатков. Известные приборы обеспечивают паспортную точность

измерений при контроле изделий с толщиной стенки в месте контроля не менее 8...12 мм и локальной сосредоточенной массой 1,5...2,5 кг (в зависимости от параметров датчика). Попытка измерения твердости изделия с меньшей толщиной стенки или меньшей массой без использования специального приспособления приводит к возникновению существенной систематической погрешности измерений.

Причиной такого ограничения являются значительные контактные усилия при динамическом индентировании, вызванные кратковременностью процесса удара. На сталях длительность процесса динамического индентирования не превышает 50 мкс. Соответственно при ударе индентором массой 4 г, имеющим предударную скорость 2 м/с, максимальное контактное усилие достигает 700 Н при контроле изделия твердостью 66 HRC. Такие значительные усилия вызывают упругий прогиб стенки изделия при ее конечной жесткости. На это расходуется часть кинетической энергии индентора, что приводит к искажению показаний прибора.

Эмпирически установлено, что при толщине стенки выше некоторого значения ее конечная жесткость перестает оказывать влияние на результаты измерения. Изделие с толщиной стенки, меньшей рекомендованного значения, будем называть нежестким.

Для контроля нежестких изделий в лабораторных или заводских условиях динамическими твердомерами используют присоединение объекта контроля к массивному основанию с помощью консистентной смазки (солидола). В том случае, если нет доступа к противоположной стороне контролируемой поверхности, она имеет форму, отличную от плоскости, либо качество этой поверхности недостаточно для притирки, присоединение массы невозможно. Примером представленного контроля таких объектов могут служить трубы. Также затруднительным представляется присоединение массы к действующим пространственным конструкциям типа ферм.

Решение проблемы контроля нежестких объектов является важной задачей с точки зрения безопасности эксплуатируемых сооружений и производств, а также для расширения производительности и возможностей производственного контроля большого класса изделий.

Исследования проводились с помощью прибора Импульс-2М [1]. Портативный прибор Импульс-2М (сертификат № 3380 в Государственном реестре средств измерений) предназначен для неразрушающего экспресс-определения твердости и предела прочности металлических изделий. Особенностью прибора является способ регистрации и обработки первичной информации, которые делают его пригодным как для проведения исследований, так и для реализации разработанных методик по отстройке от влия-

ния мешающих факторов. Прибор регистрирует не пиковые значения скорости, а весь процесс внедрения индентора в металл изделия (рис. 1).

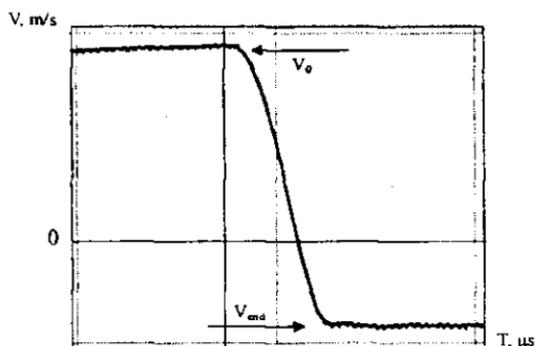


Рис. 1. Зависимость скорости внедрения индентора в металл от времени

Сигнал с магнитоиндукционного датчика скорости индентора переводится в цифровую форму встроенным АЦП с частотой 5 МГц. Полученный массив значений скорости записывается в долговременную память прибора. Дальнейшая обработка сигнала производится встроенным карманным персональным компьютером (КПК) по специальным алгоритмам. Обработка включает: фильтрацию шумов, восстановление непрерывного по амплитуде сигнала, дифференцирование и интегрирование сигнала, расчет упругой и пластической составляющих глубины внедрения индентора по принятой модели [2], расчет диаметра отпечатка и среднего контактного давления в отпечатке для каждого момента измерения. Прибор хранит как результаты измерения, сопровождаемые текстовыми комментариями, так и массив скорости индентора. Эти данные можно импортировать через USB-соединение в персональный компьютер в специальную программу для последующего хранения и анализа.

Допустимо предположить, что, уменьшая контактную силу за счет снижения кинетической энергии индентора, возможно понизить чувствительность прибора к конечной жесткости изделия.

Для исследования влияния предударной энергии индентора на погрешность определения твердости были проведены измерения приборами Импульс-2М и ТПЦ-4 на образцах в виде труб разных диаметров и с различной толщиной стенок (4...10 мм). Сравнивались показания приборов в условиях конечной жесткости объекта измерения с показаниями этого же прибора при присоединении объекта измерения к дополнительному мас-

сивному объекту. Присоединение выполнялось с помощью консистентной смазки, что увеличивало жесткость изделия до величин, когда ею можно пренебречь. Систематическая погрешность измерений, вызываемая конечной жесткостью объекта контроля, определялась как разница между средними значениями выборок. Испытания показали, что снижение кинетической энергии индентора от 9 МДж (Импульс-2М) до 2 МДж (ТПЦ-4) недостаточно для заметного снижения систематической погрешности измерений. При этом снижение энергии индентора имеет негативный эффект в виде роста требований к качеству обработки поверхности изделия.

Другим вариантом решения задачи является установление эмпирической или расчетной (методом конечных элементов) зависимости между истинной и регистрируемой твердостями изделия с конечной жесткостью. Главный недостаток данного подхода – необходимость получения эмпирической зависимости для каждого типоразмера изделия, что затруднительно для изделий с изменяющимся профилем сечения. Эксперименты по контролю длинномерных труб, хранящихся в стеллаже, показали, что показания прибора весьма чувствительны к способу и места закрепления объекта контроля. Эти недостатки сужают возможную область применения методики, основанной на калибровке прибора по конкретному типоразмеру изделий.

Таким образом, наши исследования показали недостаточную эффективность подходов, основанных на уменьшении кинетической энергии индентора или на калибровке прибора по конкретному типоразмеру изделий конечной жесткости. Оптимальным решением представляется нахождение некоего более универсального метода, который был бы основан на регистрируемой прибором информации об ударе без использования или при минимуме априорной информации о параметрах объекта контроля. Очевидно, что данных о скорости отлета индентора как единственного регистрируемого параметра недостаточно для реализации такого метода, так как данный параметр чувствителен к конечной жесткости. Дальнейшие исследования основаны на том, что прибор Импульс-2М позволяет регистрировать весь процесс внедрения индентора в металл.

В качестве объекта исследования использовались стальные трубы диаметром 60...800 мм с толщиной стенки 3,6...8 мм, пластины толщиной 4...10 мм. Область контроля подвергалась зачистке примерно до Ra 1,6.

Измерения проводились на внешней поверхности труб и подразделялись: на «нежесткие» – при консольном закреплении либо отсутствии закрепления (трубы лежали на основании); и «достоверные» – после притирки внутренней стенки трубы к стальному цилиндру несколько меньшего диаметра. Для уменьшения случайной погрешности в каждом опыте про-

водилось не менее 7 измерений, по которым потом рассчитывались средние значения параметров индентирования. Некоторые характерные результаты измерения твердости по коэффициенту восстановления скорости приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения твердости изделий конечной жесткости

Объект контроля	На массивном основании (истинное значение)		Без закрепления – измерение твердости по коэффициенту восстановления			Без закрепления – с ототройкой от недостаточной толщины		
	Твердость, НВ	Коэффициент вариации	Твердость, НВ	Ошибк. НВ	Коэффициент вариации	Твердость, В	Ошибк. НВ	Коэффициент вариации
Мера твердости	232	0,0055	188	-44	0,051	211	-21	0,035
Труба нефтепровода после 20 лет эксплуатации, толщина стенки 7 мм	163	0,0567	154	-9	0,086	165	2	0,094
Труба Ø160, толщина стенки 5 мм	130	0,3026	101	-29	0,0363	127	-3	0,0388
Труба Ø140, толщина стенки 7 мм	156	0,0370	156	0	0,037	160	4	0,042
Тавр 230×85, толщина стенки 7 мм	166	0,0432	152	-14	0,093	160	-6	0,071
Лист, толщина стенки 4 мм	128	0,0294	70	-58	0,046	109	-19	0,025
Мера твердости	269	0,0105	255	-14	0,008	267	-2	0,026
Пластина, толщина стенки 4 мм	196	0,0165	176	-20	0,012	177	-19	0,022
	196	0,0165	157	157	0,030	173	-23	0,038

Как следует из таблицы, конечная жесткость объекта измерения может вызывать существенную систематическую ошибку измерения твердости.

Анализ кривых скорости внедрения индентора в металл показал, что степень влияния конечной жесткости объекта контроля на регистрируемую скорость внедрения индентора изменяется в процессе удара. Активный этап удара (внедрение индентора в металл) является менее чувствительным к этому фактору, чем пассивный этап (упругое вытеснение индентора

из отпечатка). Физически это объясняется разным соотношением между пластической и упругой составляющей деформации на активном и пассивном этапах удара.

На рисунке 2 изображена феноменологическая модель процесса.

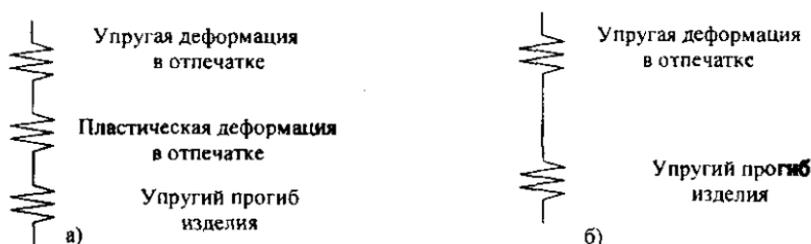


Рис. 2. Упрощенная модель упругопластического полупространства: а – на активном этапе удара, б – на пассивном этапе удара

Как видно из рисунка, на активном этапе удара податливость упругопластического полупространства C_1 определяется суммой податливостей: C_e – податливость эквивалентной пружины упругой составляющей глубины внедрения индентора; C_p – податливость эквивалентной пружины пластической составляющей глубины внедрения индентора; C_{eb} – податливость эквивалентной пружины упругого прогиба стенки изделия. Соответственно податливость полупространства на пассивном этапе удара – при упругом вытеснении индентора: $C_2 = C_e + C_{eb}$.

Так как $C_p > 0$, то $C_1 > C_2$ и

$$\frac{C_{eh}}{C_1} < \frac{C_{eb}}{C_2}. \quad (1)$$

Выражение (1) экспериментально подтверждается ходом зависимостей скорости внедрения индентора от времени при индентировании изделия конечной жесткости в свободном состоянии и после присоединения к массивному основанию.

Проведенное нами моделирование методом конечных элементов соударения индентора со стальной пластиной толщиной 5 мм, выполненное для модели с выраженной динамикой с учетом волновых и инерционных эффектов, подтверждает вышесказанное и с высокой точностью согласуется с экспериментальными данными.

Анализ 1500 измерений на объектах пониженной жесткости показал, что наименьшей чувствительностью к жесткости объекта контроля при приемлемой случайной составляющей погрешности обладает динамическая твердость Мейера, определяемая как среднее контактное давление в отпечатке в конце активного этапа удара.

На основании данного факта была разработана и встроена в прибор Импульс-2М методика по отстройке от влияния конечной (недостаточной) жесткости объекта контроля. При измерении прибор одновременно рассчитывает динамическую твердость Мейера и коэффициент восстановления скорости и определяет по каждому из них значение статической твердости. Если разница между этими значениями превышает допускаемую величину, прибор сигнализирует о том, что объект имеет пониженную жесткость, и отображает значения статической твердости (по Бринеллю и Роквеллу), рассчитанные по динамической твердости Мейера. Встроенный КПК прибора обладает достаточной производительностью для обеспечения комфортного времени измерения. Результаты использования данной методики приведены в таблице 1.

Другим недостатком, присущим твердомерам динамического действия, является низкая точность определения механических характеристик изделий с шероховатостью более $Ra\ 2,5$. Потребитель сталкивается с этим при входном, выходном и промежуточном контроле продукции, а также в случаях, когда возникновение шероховатости обусловлено износом изделия в процессе эксплуатации. Весьма актуальна эта проблема и при оценке состояния действующих конструкций в полевых условиях, когда качество поверхности даже после ее зачистки абразивным инструментом не позволяет проводить измерения с требуемой точностью. Обеспечение рекомендуемых значений шероховатости ($Ra = 1,6 \dots 2,5$ мкм) как в полевых условиях, так и на производстве не всегда целесообразно, поскольку требует существенных трудовых затрат.

Снижение требований к качеству обработки контролируемых поверхностей традиционно достигается увеличением энергии удара. При этом уменьшается доля энергии, затрачиваемая на смятие выступов профиля шероховатости, что, в свою очередь, уменьшает влияние шероховатости на результат измерения. Подобный подход позволяет повысить достоверность измерений, однако не является универсальным, поскольку приводит к значительному увеличению требований к минимальной локальной жесткости и массе контролируемого изделия. Например, твердомер Equotip (Швейцария) с датчиком G позволяет контролировать поверхности с шероховато-

стью до 7 мкм. При этом локальная масса изделия в месте удара должна составлять не менее 15 кг, что практически исключает возможность безобразового контроля объектов с ограниченной массой или толщиной стенки (трубопроводы, сосуды высокого давления, металлоконструкции).

Несмотря на указанные ограничения, для всех известных динамических твердомеров увеличение энергии удара является единственным способом решения проблемы. Причина заключается в малой информативности применяемых методов получения первичной информации о процессе удара. Регистрация только одного параметра (коэффициента восстановления скорости), имеющего высокую чувствительность к мешающему фактору (шероховатости поверхности) значительно затрудняет отстройку от его влияния.

Данного недостатка лишен описанный выше метод динамического индентирования, позволяющий за один удар определить несколько параметров, характеризующих процесс внедрения индентора в контролируемый материал. Основными из них являются: длительность активного этапа удара t_a ; максимальная глубина внедрения индентора α_{max} ; контактная сила при максимальном внедрении $F_{V=0}$; коэффициент восстановления скорости e и динамическая твердость по Мейеру HM .

Для того чтобы оценить эффективность использования в качестве исходных данных разных параметров индентирования, нами был проведен эксперимент по определению степени влияния на них шероховатости [3]. Измерения проводились на трех образцах с твердостью 147, 318 и 438 НВ. На каждом из образцов были выполнены четыре зоны с различной нерегулярной шероховатостью (от 0,4 до 5,5 мкм). В каждой зоне проводилось не менее 10 измерений и вычислялись значения t_a , α_{max} , $F_{V=0}$, e и HM . Кроме того, чтобы оценить влияние шероховатости на процесс внедрения индентора в металл, анализировались регистрируемые при каждом измерении зависимости $F(\alpha)$. Кривые внедрения, полученные на образцах с твердостью 147 и 318 НВ при различных значениях шероховатости, показаны на рисунке 3. Видно (см. рис. 3), что с ростом шероховатости изменяется соотношение между глубиной невосстановленного отпечатка и контактным усилием в отпечатке на активном этапе удара. В результате одна и та же величина, например, максимальной глубины внедрения индентора или контактной силы при максимальном внедрении может соответствовать материалу с низкой твердостью и малой шероховатостью либо материалу с высокой твердостью, но имеющему грубо обработанную поверхность.

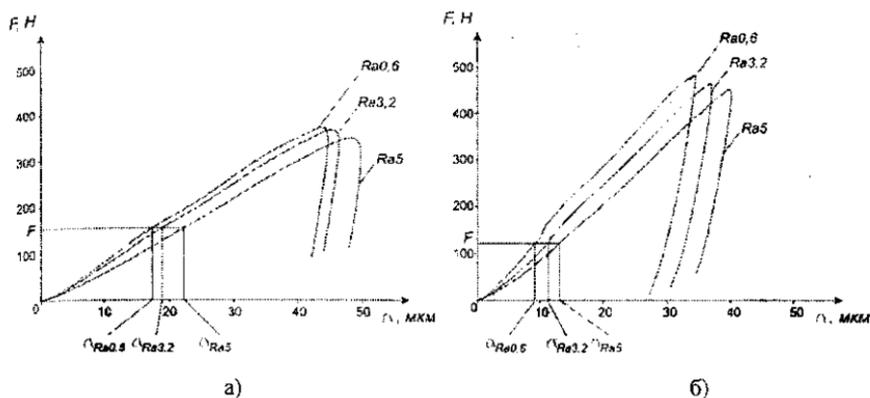


Рис. 3. Зависимость контактного усилия от глубины внедрения индентора в металл:
 а – твердость образца 147 НВ; б – твердость образца 318 НВ

Таким образом, метод определения твердости как функции какого-либо одного параметра индентирования не обеспечивает требуемой точности при контроле изделий с низким качеством обработки поверхности. В то же время результаты экспериментов показали, что чувствительность различных параметров индентирования к шероховатости отличается. Это позволяет путем использования в качестве исходных данных двух параметров индентирования избавиться от неоднозначности определения твердости.

Разработанная методика отстройки [3] основывается на установленной в ходе исследований закономерности между параметрами e и HM , измеренными при одинаковой твердости основного металла изделия, но при разных значениях шероховатости его поверхности (рис. 4). Эта закономерность в диапазоне от 100 до 450 НВ достаточно точно описывается линейной зависимостью $HM = ae + b$ (см. рис. 4, прямые 2, 3 и 4).

Значения коэффициентов a и b изменяются пропорционально твердости, измеренной на гладких поверхностях, которой соответствует коэффициент восстановления e_0 .

Алгоритм корректировки заключается в определении коэффициентов a и b прямой, проходящей через измеренную точку X , и последующем вычислении по полученным коэффициентам значения e_0 .

Координаты точки X e_x и HM_x находятся путем усреднения результатов группы измерений – совокупности измерений, соответствующих определенному участку поверхности контролируемого изделия. Коррекция ре-

зультатов выполняется для средних значений (математического ожидания) группы измерений, так как индивидуальные измерения в силу случайного характера влияния шероховатости не могут быть уточнены с достаточной достоверностью.

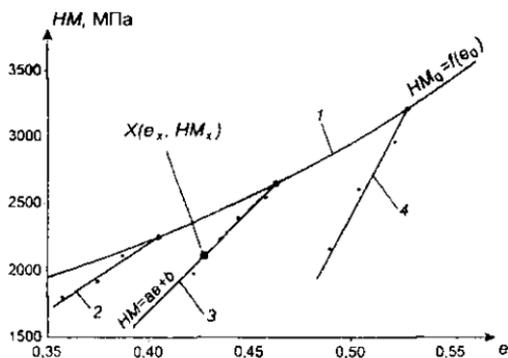


Рис. 4. Соотношение между динамической твердостью по Мейеру и коэффициентом восстановления скорости:
 кривая 1 соответствует гладким поверхностям (Ra не более 0,6 мкм);
 прямые 2, 3, 4 – шероховатости $Ra = (0,6 \dots 5)$ мкм

Предложенная методика позволила значительно снизить влияние шероховатости контролируемой поверхности на величину измеренной твердости (табл. 2).

Таблица 2

Оценка эффективности определения твердости по двум параметрам

Твердость образца, НВ	Ra , мкм	Абсолютная погрешность определения твердости, НВ	
		При использовании традиционного метода (по одному параметру)	При вычислении твердости как функции двух параметров (e и HM)
147	1,6	2,6	4,6
	3,2	5,4	6,8
	5,5	16,7	4,8
318	1,6	6,7	7,1
	3,2	23,5	4,9
	5	43,0	3,7
438	1,6	2,0	6,2
	2,5	14,6	6,0
	4,5	30,1	2,8

Заключение. Проведен анализ влияния ограниченной жесткости и массы контролируемого изделия, а также шероховатости его поверхности на величину измеренной твердости. Показано, что общепринятый метод определения твердости по коэффициенту восстановления скорости не позволяет контролировать нежесткие или грубо обработанные металлические изделия с требуемой точностью, так как этот параметр в значительной степени подвержен влиянию указанных мешающих факторов. Описаны методики минимизации влияния мешающих факторов, позволяющие контролировать изделия с толщиной стенки от 5,5 до 6 мм и шероховатостью поверхности Ra 4...5 с паспортной точностью. Разработанные методики основаны на использовании в качестве исходных данных при определении твердости всего процесса внедрения индентора в металл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамический прибор для контроля механических свойств магистральных трубопроводов / А.В. Рабцевич [и др.] // Энергетика и ТЭК. – 2006. – № 3. – С. 12 – 14.
2. Рудницкий, В.А. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов / В.А. Рудницкий, А.В. Рабцевич // Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79 – 86.
3. Мацулевич, О.В. Контроль поверхностей с низким качеством обработки методом динамического индентирования / О.В. Мацулевич, А.В. Рабцевич, В.А. Рудницкий // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2007. – № 3. – С. 116 – 121.

УДК 620.179.14/15

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ МАГНИТНЫХ ШУМОВ

В.Л. Венгринович, Д.В. Дмитриевич
ГНУ «ИПФ НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Определение параметров плосконапряжённого состояния является необходимой частью оценки остаточного ресурса стальных конструкций и изделий. Ресурс многих важных деталей механических конструкций зависит от скорости образования дефектов, которая в свою очередь зависит от уровня напряжений. Остаточные напряжения являются как бы фоном, на

котором возникают такие дефекты, как трещины, стресс-коррозионные повреждения, водородное охрупчивание и др., т.е. наиболее опасные дефекты сплошности основного металла и сварных швов. Поэтому измерение остаточных напряжений в металлоконструкциях является одной из важнейших проблем технического диагностирования.

Существуют различные методы оценки напряжений неразрушающими методами. Главным образом это касается одноосного напряжённого состояния. В то же время неопределённость контроля напряжений при 2-осном напряжённом состоянии пока ещё значительна. Основные трудности связаны с калибровкой аппаратуры для измерения плосконапряжённого состояния. В настоящей работе предпринята попытка разработать методику такой калибровки.

Магнитные шумы являются значительным фактором стабильности и разрешающей способности многих магнитных устройств и представляют широкое поле для физических исследований.

Некоторые исследователи высказывают мнение, что со временем шумовые параметры ферромагнетиков войдут в стандарты наряду с другими их характеристиками.

Одним из эффективных методов контроля остаточных и приложенных напряжений ферромагнитных материалов, характеристик микроструктуры, толщины упрочненных слоев и других параметров зарекомендовал себя метод эффекта Баркгаузена, основанный на использовании явления смещения доменных границ ферромагнитных кристаллов под воздействием меняющихся напряжений.

В настоящее время при контроле механических напряжений металлических конструкций с помощью метода эффекта Баркгаузена используют одноосную калибровку. С точки зрения теории сопротивления материалов данный подход применим в некоторых простейших случаях, в силу того, что на практике не существует чистого одноосного напряженно-деформированного состояния (НДС).

Предсказывая внутренние напряжения в сталях посредством шума Баркгаузена (ШБ), наряду с высокой чувствительностью существуют несколько сопутствующих влияющих факторов, которые способны вносить существенную долю неопределённости в результаты измерения. Это такие факторы, как: микроструктура, поверхностная неоднородность, обезуглеороженность поверхности и т.д.

Ранее были предприняты попытки для уменьшения неопределённости измерения напряжений: введение так называемого «jumpsum» параметра

вместо интенсивности ШБ, сравнение измерений магнитного и акустического ШБ, стабилизация значения магнитного потока в катушке намагничивания, и др.

В работе показано, что имеются новые возможности минимизировать неточности в измерении напряжения посредством как введения новых информативных параметров шума, так и с помощью двухосной калибровки измерительной аппаратуры.

Первый подход основан на том, что при увеличении амплитуды намагничивающего поля наблюдается скачок ШБ в некоторой области значений поля, так называемое «поле старта». Выполненные в работе исследования показывают, что при использовании этого параметра неопределенность измерения напряжения на фоне неизвестных влияющих факторов может быть снижена.

Второй подход основан на построении экспериментальных диаграмм изменения информативных параметров в условиях двухосной деформации крестообразных образцов. Эксперименты выполнялись с использованием магнитошумового анализатора «Introscon».

Измерения проводились по двум схемам: изгибной и на растяжение-сжатие на образцах из стали 3 и стали 45 в закаленном и отпущенном состояниях. Построены двухосные диаграммы для обеих схем нагружения.

Получены корреляции между деформациями и магнитошумовыми параметрами.

Экспериментально установлены взаимосвязи между результатами измерения магнитных шумов в обоих главных направлениях, на основе чего сделаны выводы о возможности существования интегрированных характеристик магнитных шумов, робастных по отношению к влияющим факторам, среди них:

- шаровая и девиаторная функции напряжений;
- отношение этих функций;
- напряжение Мизеса.

Полученные трёхмерные диаграммы зависимости этих параметров от распределения главных напряжений сопоставляются с известными теоретическими закономерностями двухосного НДС.

Разработка образцов для построения калибровочных характеристик. Приведенные исследования выполнены для случая изгиба при постоянных или ступенчато изменяющихся значениях величин одноосных напряжений. Такого рода опыты позволили обеспечить построение калибровочных характеристик для одноосно деформированных элементов сталь-

ных конструкций. В конструкциях типа пластин и оболочек напряженно-деформированное состояние (НДС) обычно является плоским.

Определяющими соотношениями для плоского НДС являются соотношения обобщенного закона Гука:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}[\sigma_1 - \lambda\sigma_2]; \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}[\sigma_2 - \lambda\sigma_1]; \\ \varepsilon_3 &= -\frac{\lambda}{E}[\sigma_1 + \sigma_2].\end{aligned}\quad (1)$$

где индексы $1, 2$ и 3 соотносятся с главными направлениями; λ – коэффициент Пуассона материала; E – модуль Юнга.

Относительно напряжений обобщенный закон Гука приводится к виду:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= -\frac{E(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{1 + \lambda}; \\ \sigma_2 &= -\frac{E(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{1 + \lambda}.\end{aligned}\quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) видно, что основным отличием плоского НДС от одноосного является зависимость деформаций и напряжений в каждом из главных направлений от деформаций и напряжений в альтернативных главных направлениях соответственно. Очевидно также, что по измерению магнитного шума в каждом из главных направлений невозможно судить о величине напряжений в соответствующем направлении без знания напряжений в альтернативных направлениях.

Таким образом, для заключения о величине напряжений по сигналам магнитного шума возможно либо решение сложной системы уравнений с учетом обобщенного закона Гука, совместности деформаций, условий равновесия и двухмерной функции $S(\sigma_1, \sigma_2)$, либо использование калибровочных характеристик для плоского напряженного состояния, полученных экспериментально. Нами рассматривается только второй случай из-за множества неопределенностей, возникающих при использовании расчетного метода. Схематически принимаем приложение сил на одной из пар плеч образца, на второй паре они действовали аналогично. При создании сжимающих напряжений силы были направлены в противоположную сторону.

На рисунке 1 показана схема расположения датчиков деформаций и магнитошумовых преобразователей на образце. Определение оптимальной

Форма образца (см. рис. 2, а) была в дальнейшем использована в экспериментах. Измерения проводились с помощью прибора «Интроскан».

Новые подходы к повышению эффективности неразрушающего контроля НДС с помощью метода магнитных шумов. Предварительные результаты измерений чувствительности магнитных шумов к двухосному напряженно-деформированному состоянию приведены ниже. В процессе ступенчатого изменения деформации определялись величины деформаций по направлениям X и Y , которые откладывались по соответствующим осям. В зависимости от положения преобразователя Баркгаузена измерялись значения $S(\sigma_1)$ и $S(\sigma_2)$, которые откладывались по оси ординат. Затем результаты дискретных измерений аппроксимировались с помощью двухмерных степенных полиномов.

Пример зависимости магнитного шума по X , $S(\sigma_1)$, от двухосных относительных деформаций ϵ_1 и ϵ_2 показан на рисунке 3.

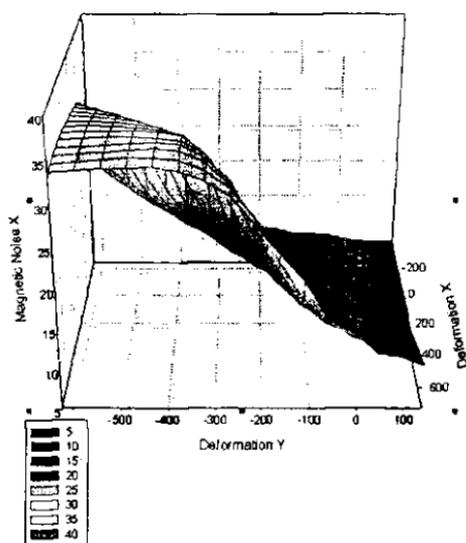


Рис. 3. Зависимость магнитного шума по X от двухосных деформаций крестообразного образца из сплава ВНС-2

Здесь и далее для получения значений деформаций по осям X и Y следует умножить приведенные на графиках значения на 10^{-6} . Значения магнитного шума по оси Z приведены в относительных единицах. Следует обратить внимание, что деформации по каждой из осей в данном случае про-

изводились в условиях стесненных деформаций по взаимно перпендикулярным осям – случай, который наиболее характерен в практике работы оболочек и пластин.

Как видно, стесненное деформированное состояние существенно изменяет картину чувствительности магнитного шума к НДС. Суть этих изменений ведет в отдельных случаях даже к изменению знака кажущейся чувствительности, тогда как истинный знак чувствительности для ферромагнитных материалов с положительной константой магнитострикции также является положительным. Имеющая место при одноосных измерениях нелинейность также возникает и в двухосном случае. Для пластичных материалов типа сталь Ст3 она имеет место при значительно более низких величинах деформаций (рис. 4).

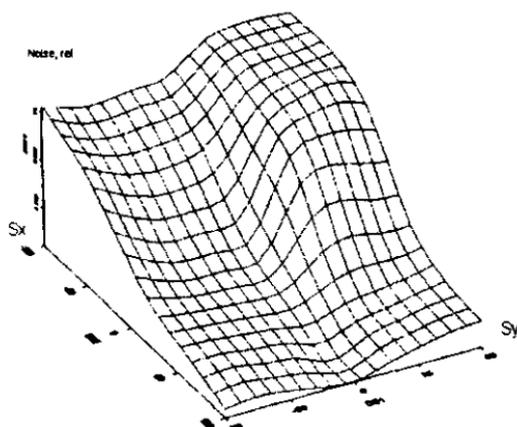


Рис. 4. Зависимость магнитного шума по X от двухосных деформаций крестообразного образца из стали Ст3

Существенный интерес представляет поведение разности значений интенсивности магнитного шума по двум взаимно перпендикулярным осям, которую можно ассоциировать с девиатором напряжений, от величин соответствующих деформаций по осям. Этот интерес связан с высказанным ранее предположением о специфической чувствительности значений разности макроскопических магнитных характеристик, измеренных по двум главным направлениям, к изменению напряжений по двум главным направлениям при плосконапряженном состоянии.

При плоскодеформированном состоянии наблюдается определенная особенность – зависимость становится близкой к линейной (рис. 5).

На рисунке 5 по оси ординат отложены разности значений $S(\sigma_1) - S(\sigma_2)$ в зависимости от величин деформаций по двум главным осям.

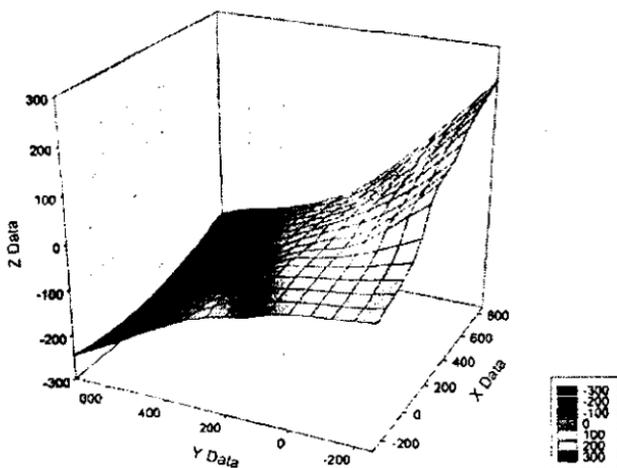


Рис. 5. Зависимость разности измеренных значений интенсивности магнитного шума $S(\sigma_1) - S(\sigma_2)$ в образце из стали Ст3 от величин деформаций по двум главным осям

Одной из важнейших характеристик НДС является напряжение Мизеса:

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_1 \cdot \sigma_2, \quad (3)$$

которое определяет сдвиговые напряжения в материале, ответственные за сдвиговую деформацию. Она в свою очередь обуславливает изменение магнитных свойств.

На рисунке 6 показана рассчитанная зависимость деформации Мизеса от величин деформаций по главным осям.

Представляет также интерес, как ведет себя поверхность, подобная поверхности Мизеса, но рассчитанная как поверхность величины интенсивности магнитного шума по отношению к главным деформациям. Такая поверхность, полученная экспериментально, приведена на рисунке 7.

На седлоподобной поверхности четко прослеживается минимум в направлении, близком к диагональному на плоскости $X-Y$, соответствующему равенству главных деформаций. В свою очередь условие равенства главных деформаций соответствует условиям равенства минимуму сдвиговых деформаций Мизеса (см. рис. 5) и максимуму шаровой компоненты

тензора деформаций, влияние которой на магнитные характеристики является минимальным.

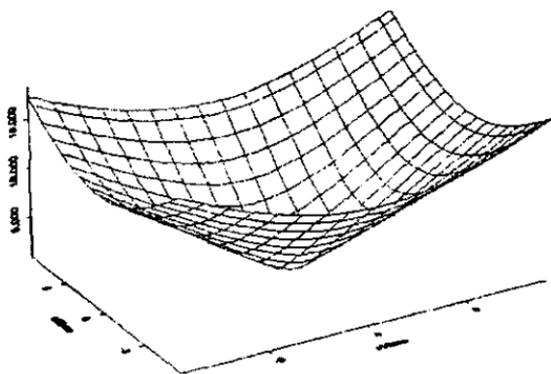


Рис. 6. Поверхность Мизеса в зависимости от деформаций во взаимно перпендикулярных направлениях

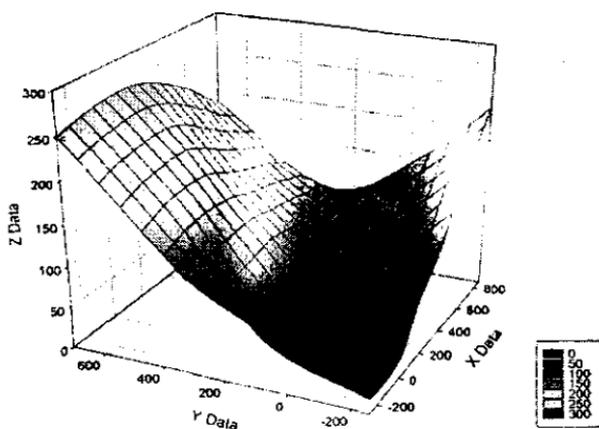


Рис. 7. «Поверхность Мизеса» для интенсивности магнитного шума, полученная экспериментально по двухосной деформации сплава ВНС-2

Анализ графика и численных данных с определенной степенью достоверности позволяет предположить, что определяющее влияние на изменение «поверхности Мизеса» магнитного шума оказывает именно девиаторная компонента деформаций, определяющаяся для плоского напряженного состояния разностью главных деформаций.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Н.В. Грунтович¹, А.А. Кибалко¹, М.Н. Клебанова²

¹ОАО «Белгорхимпром», Минск, Беларусь.

²УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк, Беларусь

Наблюдается рост техногенных и экологических катастроф, обусловленных большим износом оборудования и неспособностью человека их предотвратить. Износ оборудования составляет 70...80 %, а на отдельных предприятиях износ оборудования достигает более 85 %.

Для предотвращения аварий необходимы современные диагностические приборы. Многоканальный диагностический прибор МДП-11423 позволяет свести к минимуму внезапные неплановые остановки технического оборудования, выполнять входной контроль агрегатов и запасных узлов при их покупке, перед ремонтом и после ремонта.

Согласно проведенному анализу в организациях концерна «Белнефтехим» в 2006 году основными причинами инцидентов были:

- 37 % – отказы электрооборудования;

- 30,5 % – выход из строя технологического оборудования по причинам его физического старения и плохого качества ремонта.

В этой связи существенно возрастает роль технической диагностики.

Остановимся на некоторых проблемах этой науки, которые возникли в последние годы, и возможных путях их решения.

1. Отсутствует концепция технической диагностики:

- слабая подготовка кадров по технической диагностике;

- недостаточное количество учебников, методик, стандартов по технической диагностике;

- слабое оснащение организаций концерна современными диагностическими приборами, крайне недостаточный перечень приборов, которые выпускаются в Беларуси.

2. Методические ошибки при техническом диагностировании:

- неадекватный выбор метода диагностирования;

- неправильный выбор способа обработки полученной информации;

- плохое знание физических основ объекта диагностирования;

- неумение определить исправность прибора и достоверность измерений;

- неправильный выбор частотного диапазона при измерении вибрации;

- неправильный выбор режима работы оборудования при диагностировании;

- неумение учитывать помехи и проводить комплексное диагностирование;

- неправильный выбор реперных точек.

3. Организационно-технические ошибки:

- отсутствие банка диагностической информации и дефектов однотипных механизмов по отрасли;

- неправильное оформление заявки на подшипники качения;

- отсутствие входного контроля качества подшипников качения перед установкой на механизм;

- плохая подготовка посадочных мест для подшипников качения;

- нарушение технологии при съеме и посадке подшипников качения;

- неумение выбрать пороговое значение при оформлении заключения;

- отсутствие методологических принципов управления износом и старением оборудования.

Периодическое и плановое техническое диагностирование позволит решать следующие главные задачи:

1) выполнять входной контроль агрегатов и запасных узлов при их покупке, перед ремонтом и после ремонта;

2) свести к минимуму внезапные unplanned остановки технического оборудования;

3) управлять старением оборудования.

Для решения всех этих задач необходимы современные диагностические приборы. В качестве примера рассмотрим переносной многоканальный, многопараметрический прибор для диагностирования различных объектов (рис. 1).



Рис. 1. Многоканальный диагностический прибор МДП-11423

Измерительные каналы:

- 1) измерение вибрации – 2 канала;
- 2) измерение тока – 2 канала;
- 3) измерение напряжения – 2 канала;
- 4) измерение оборотов – 1 канал;
- 5) измерение магнитного поля – 2 канала.

В качестве иллюстрации на рисунке 2 приведен протокол ввода параметров диагностируемого электродвигателя; на рисунке 3 – протокол ввода параметров диагностируемого механизма.

ЭЭ
 Программа диагностики дефектов "Тягунца"
 Данные Механизм

Параметры двигателя

Обозначение				4МВт
Частота питающей сети (Гц)	< f0 >			50.0
Частота вращения вала (об/мин)	< n1 >			2970.0
Число зубьев статора	< Z1 >			48
Число зубьев ротора	< Z2 >			36
Число пар полюсов	< 2P >			1

Число пар полюсов

1	2	3	4	5	6	8
3000	1500	1000	750	600	500	375

Частота синхронного поля

Ввод Отменить

Рис. 2. Протокол ввода параметров диагностируемого электродвигателя

ЭЭ D:\Обла
 Программа диагностики дефектов "Тягунца"
 Данные Двигатель

Параметры насоса

Обозначение механизма				Насос
Тип механизма (насос, двигатель)	< n >			1480.0
Число оборотов в минуту	< n >			6
Число лопастей на одном колесе	< K >			4
Число колес на ступени	< K1 >			1
Число зубьев на колесе редуктора	< Z1 >			1
Число зубьев на колесе редуктора	< Z2 >			1
Передационное число редуктора	< j >			1.0
Количество подшипников в механизме				3
Подшипник первый				317-1
Подшипник второй				2317
Подшипник третий				317-3
Подшипник четвертый				2317

Ввод Отменить

Рис. 3. Протокол ввода параметров диагностируемого механизма

На основе математической модели вычисляются информативные частоты и выдается протокол определения информативных частот

В компьютерную программу вводятся измеренные спектры вибрации (рис. 4) и формируется диагностическая модель обработки спектрограммы подшипника (рис. 5).

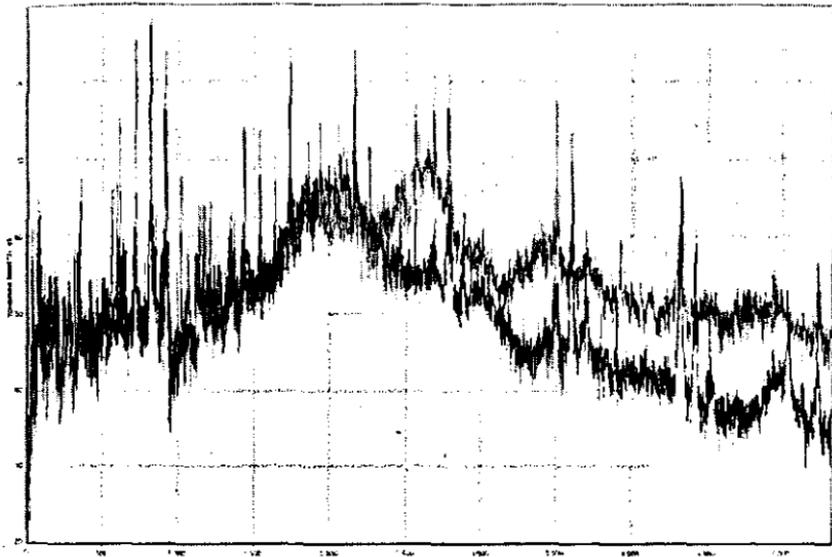


Рис. 4. Спектр вертикальной вибрации электродвигателя Н-216

D:\Объем1648-1\ТАЖАМ_1.FX [] X

Обработка спектрограммы подшипника

№	Р,Гц	КНИ,дБ	Изн,дБ	КНИ,дБ	Изн.
1	14.3	118.6		48.6	
2	28.7	112.2	44.639	38.8	Мал.
3	5.9	133.4		42.8	
4	17.7	107.7	76.719	45.8	Мал.
5	15.18	106.2	0	88.9	XXXX
6	32.9	111.9	43.271	38.6	Мал.
7	988	108.2	42.986	68.5	Мал.
8	18.6	113.3	59.176	36.6	Мал.
9	558	106.0	72.193	46.5	Мал.
10	8.4	133.4		36.2	
11	257	108.9		51.5	
12	638	105.2	80.416	61.2	Мал.
13	545	108.5	74.519	52.6	Мал.
14	1089	107.7	0	78.8	XXXX

№	Р,Гц	КНИ,дБ	Изн,дБ	КНИ,дБ	Изн.
15	86.0	107.9		54.9	
16	57.3	107.5	47.287	38.3	Мал.
17	108	118.0	74.898	62.4	Мал.
18	200	107.3	78.91	55.7	Мал.
19	71.3	108.2	58.373	48.6	Мал.
20	-21.7	118.6	0	68.7040	XXXX
21	-42.2	0	0	0	XXXX
22	2300	107.7	0	73.7	XXXX
23	3150	0	0	0	XXXX
24	4500	0	0	0	XXXX
25	50.0	111.9		54.3	
26					

Рис. 5. Протокол обработки спектрограммы подшипника

Компьютерная программа позволяет выявить *дефекты асинхронных и синхронных двигателей*:

- неисправности подшипников скольжения;
- неисправности подшипников качения;
- нарушение соосности магнитного поля статора и ротора;
- ослабление расклиновки обмотки статора;
- ослабление жесткости статорной обмотки в лобовой части;
- нарушение изоляции стяжных болтов активного железа статора;
- ослабление прессовки крайних пакетов электротехнической стали статора;
- магнитную несимметрию в двигателе;
- электрическую несимметрию фаз двигателя;
- насыщение магнитной цепи двигателя при нарушении отношения U/f от расчетных при работе от вентильных преобразователей;
- старение и высыхание изоляции статорной обмотки;
- овальность ротора и бочки статора.

Компьютерная программа выявления *дефектов подшипников качения*:

- *заводские дефекты* подшипников качения: некруглость тел качения; овальность внутреннего кольца; трехвыпуклость внутреннего кольца; неравномерность зазоров между телами качения и кольцами (разные диаметры тел качения); повышенная волнистость колец; раковины на кольцах и телах качения;

- *эксплуатационные дефекты* подшипников качения: заводские дефекты, которые приводят к интенсивному износу узлов подшипников качения; перекос внутреннего кольца; перекос наружного кольца; трещины на внутреннем кольце; износ сепаратора; неоднородный радиальный натяг; износ тел качения; загрязнение смазки.

Компьютерная программа позволяет выявить *дефекты машин постоянного тока*:

- высыпание изоляции и ослабление прессовки шунтовой обмотки;
- ослабление прессовки активного железа главных полюсов;
- износ коллектора;
- нарушение соосности магнитного поля индуктора и якоря (осевая вибрация);
- нарушение коммутации;
- витковые замыкания в шунтовой обмотке;
- витковые замыкания в якорной обмотке;
- витковые замыкания обмотки добавочных полюсов;
- износ подшипников качения;
- износ подшипников скольжения;
- неравномерность зазора между главными полюсами и якорем.

В интерактивном режиме проводятся анализ и диагностирование и в результате выдаются: протокол диагностирования дефектов подшипника (рис. 6); протокол диагностирования дефектов механизма; протокол диагностирования износа.

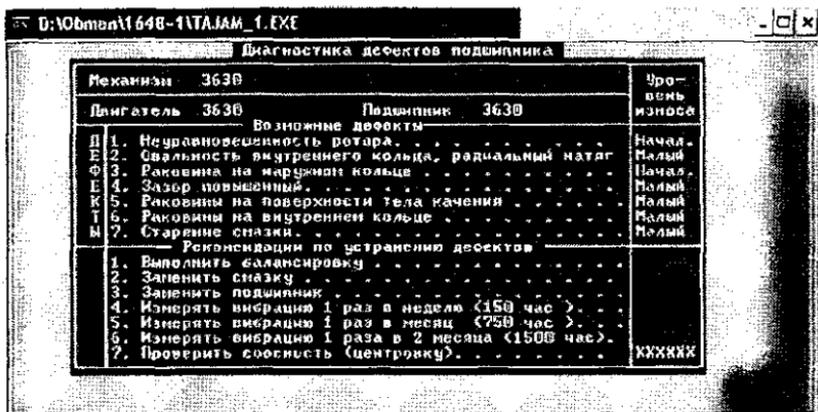


Рис. 6. Протокол диагностики дефектов подшипника

ЛИТЕРАТУРА

1. Вибродиагностика: моногр. / Г.Ш. Розенберг [и др.]; под ред. Г.Ш. Розенберга. – СИБ: ПЭНПК, 2003. – 284 с.

УДК 620.179.14

ВИХРЕТОКОВЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ДЕФЕКТОСКОП С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

А.В. Чернышев, И.Е. Загорский

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь

В Институте прикладной физики НАН Беларуси проводятся работы по разработке аппаратуры для вихретоковой дефектоскопии. Например, был разработан, изготовлен и внедрен на Минском моторном заводе автоматизированный вихретоковый дефектоскоп с многоэлементным преобразователем, предназначенный для контроля чугунных гильз цилиндров дизельных двигателей. С его помощью в настоящее время проводится 100 % контроль

гильз, производимых на этом заводе. Гильзы имеют форму, подобную отрезку трубы, поэтому нет принципиальных трудностей для его применения при дефектоскопии труб. При разработке дефектоскопа решались проблемы, типичные для вихретоковой дефектоскопии, – обеспечить с высокой достоверностью выявление относительно малых дефектов (имеющих небольшие геометрические размеры протяженности, глубины, ширины раскрытия) при наличии различного рода мешающих факторов. Кроме этого, требовалось обеспечить относительно высокую производительность контроля при максимальной простоте его эксплуатации и автоматизированном процессе контроля. Рассмотрению указанных вопросов и посвящена данная работа.

Введение. Вихретоковый метод дефектоскопии основан на анализе электрического сигнала, возникающего в преобразователе дефектоскопа под действием вторичного электромагнитного поля вихревых токов, возникающих в объекте контроля под действием первичного электромагнитного поля возбуждения. К преимуществу этого метода можно отнести высокую производительность, особенно при контроле объектов цилиндрической формы (в частности, труб), когда при применении набора накладных преобразователей удается обеспечить высокую чувствительность к различным дефектам сплошности и обеспечить контроль значительного по площади участка его поверхности за один оборот контролируемого объекта на 360 град. Понятно, что по мере роста числа преобразователей дефектоскопа увеличивается размер такого участка. Также при вихретоковом методе удается довольно просто обеспечить автоматизированный режим контроля (его можно проводить бесконтактным методом, т.е. при отсутствии контакта между преобразователем дефектоскопа и контролируемым изделием); обнаружить подповерхностные дефекты; проводить приблизительную оценку размеров дефекта, в частности, его глубины. Ферромагнитные изделия после проведения контроля остаются в размагниченном состоянии, что, например, при контроле гильз цилиндров является обязательным условием.

Постановка задачи. При разработке дефектоскопа для контроля гильз цилиндров двигателя необходимо было обеспечить выполнение следующих условий. По техническим условиям на внутренней поверхности гильзы цилиндров не допускаются никакие дефекты сплошности металла, кроме точечной пористости, образующейся в результате выкрашивания графита и металлической основы по границам графитовых включений при механической обработке. Как показали исследования, основными видами дефектов в гильзах цилиндров являются в первую очередь трещины, а

металла. Так как все они могут иметь относительно небольшие геометрические размеры, то дефектоскоп должен обладать по возможности максимальной чувствительностью к дефектам сплошности. Однако трещины малой глубины, ширины раскрытия, мелкие поры, раковины, рыхлоты вызывают относительно небольшие изменения информационного электрического сигнала, по которому в дефектоскопе проводится контроль, относительно сигнала с бездефектного участка гильзы. Похожие изменения информационного сигнала могут вызывать вариации магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости, которые всегда имеют место на практике при перемещении преобразователя по контролируемой поверхности гильзы цилиндра, изготовленной из чугуна, и которые относятся к так называемым мешающим факторам. Поэтому основной проблемой при разработке дефектоскопа было достижение максимально возможной чувствительности его к дефектам сплошности с максимально возможной отстройкой от влияния мешающих факторов. Кроме этого, необходимо было обеспечить максимальную простоту работы с дефектоскопом для оператора, т.е. в процессе работы с ним должны отсутствовать какие-либо настройки, регулировки, процесс контроля должен быть полностью автоматизирован. Также было необходимо обеспечить довольно высокую производительность контроля – требуется проверять не менее двух гильз в минуту.

Способ решения поставленной задачи. Для обеспечения требуемой производительности контроля в дефектоскопе имеются два держателя, в которых находится определенное число накладных преобразователей.

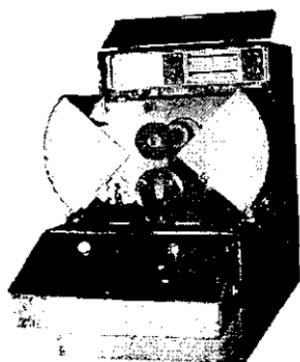


Рис. 1 Вихретоковый дефектоскоп, в измерительном отсеке которого установлена контролируемая гильза цилиндра

После размещения гильзы цилиндров в отсеке контроля дефектоскопа, как показано на рисунке 1 (где показан дефектоскоп), один держатель с набором преобразователей приближается к ее внутренней поверхности, а второй – к наружной. Затем гильза приводится во вращение на угол, несколько превышающий 360 град, в процессе которого проводится сканирование обеих поверхностей с целью обнаружения на них дефектов. В результате обеспечивается требуемая производительность дефектоскопа, время вращения гильзы цилиндра составляет 13 с.

В качестве преобразователей применены преобразователи трансформаторного типа, каждый из них содержит катушку переменного поля возбуждения и измерительную.

Необходимая чувствительность к дефектам сплошности достигается подбором резонансной частоты колебательного контура, создаваемого катушкой возбуждения и подключаемого к ней конденсатора.

Резонансная частота выбирается такой, чтобы изменения вносимых в катушку поля возбуждения сопротивлений (как активного, так и реактивного), которые происходят при перемещении преобразователя из бездефектной области гильзы в область с дефектом сплошности ее материала, приводили к изменению амплитуды эдс измерительной катушки в одном и том же направлении, например, к ее возрастанию.

Для исключения каких-либо подстроек в процессе работы с дефектоскопом был применен динамический режим работы [1], позволяющий использовать модуляционный метод выделения информации [2], получаемой с измерительной катушки преобразователя в процессе сканирования поверхностей гильзы. Более конкретно данный способ был осуществлен следующим образом. Каждый преобразователь питается переменным током возбуждения от отдельного генератора, а напряжение с каждой измерительной катушки преобразователя анализируется в своем отдельном измерительном канале. Переменное напряжение с измерительной катушки преобразователя поступает на вход амплитудного детектора, после которого оно поступает на вход фильтра верхних частот, не пропускающий постоянную составляющую входного напряжения, ослабляющий его низкочастотные составляющие. Частота среза этого фильтра определяется по результатам анализа сигналов, полученных при проведении измерений на гильзах цилиндров в процессе наладки дефектоскопа. Сущность достигаемого в этом случае улучшения отношения сигнал от дефекта к сигналу от помехи (сигнал/помеха) состоит в том, что эти сигналы различаются частотными спектрами. Обычно дефекты характеризуются большей локальностью, чем различные структурные неоднородности в материале гильзы, в которых наблюдаются непостоянство магнитных и электрических параметров. В результате сигнал от дефекта имеет более широкополосный частотный спектр, чем сигнал от неоднородностей, в котором преобладают низкочастотные составляющие. После прохождения через фильтр верхних частот с оптимально подобранной частотой среза достигается повышение отношения сигнал/помеха. Пример сигнала, полученного на выходе фильтра верхних частот, в зависимости от угла поворота гильзы, совершающей вращение с постоянной угловой скоростью, показан на рисунке 2 (на сигналы от дефекта указывают надписи на рисунке).

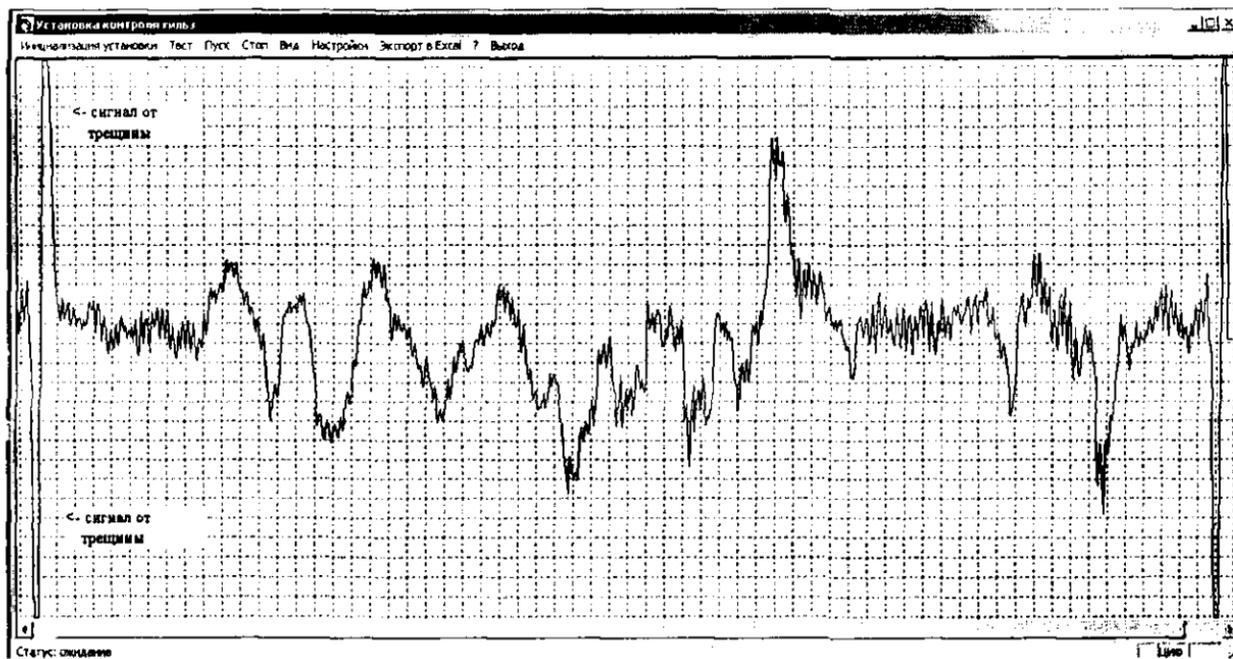


Рис. 2. Сигнал на выходе фильтра верхних частот в зависимости от угла поворота гильзы

В данном случае время, в течение которого проводились измерения, превышало период вращения гильзы, поэтому на рисунке 2 имеются два сигнала от дефекта (они расположены в левой области рисунка и в правой). Остальные локальные максимумы, минимумы амплитуды выходного напряжения преобразователя вызваны непостоянством магнитных и электрических параметров материала гильзы на разных ее участках, т.е. являются помехами. В данном случае дефектом является искусственный узкий паз длиной 9 мм, глубиной 0,5 и шириной 0,3 мм. По мере уменьшения глубины дефекта, ширины его раскрытия, при наличии над дефектом слоя металла (т.е. дефект подповерхностный) амплитуда сигнала от него на выходе фильтра становится все меньше. Она может быть намного меньше амплитуды сигнала от помехи. Кроме этого, сигнал от помехи может иметь амплитуду, превышающую амплитуду от относительно «большого» дефекта. Поэтому проводить контроль просто по достижению амплитудой сигнала на выходе фильтра верхних частот некоторого порогового значения не удастся, необходимы дополнительные критерии для распознавания сигналов от дефекта сплошности и сигналов, возникающих из-за непостоянства магнитных и электрических параметров материала гильзы цилиндра. Один из таких критериев основывается на том, что в процессе пересечения преобразователем локального дефекта сплошности на выходе фильтра верхних частот формируются два импульсных сигнала примерно равной амплитуды, но разной полярности (см. рис. 2). При этом предварительно определяется, какой полярности должен быть первый по времени возникновения импульсный сигнал, когда преобразователь пересечкает дефект сплошности [3].

Наилучший результат в вопросе распознавания сигналов от дефектов на фоне сигналов от различных мешающих факторов удастся получить при анализе сигнала, получаемого на выходе фильтра верхних частот в процессе сканирования контролируемой поверхности, при помощи компьютера с использованием специальной программы, в которой необходимо учесть особенности, которые зависят от конкретной решаемой задачи.

Для выявления трещин, имеющих глубину порядка 0,2 мм, частота поля возбуждения должна составлять несколько сотен килогерц. Однако при такой частоте оказывается низкой чувствительность к подповерхностным дефектам. Для выявления таких дефектов в области гильзы, где она испытывает максимальную нагрузку при эксплуатации, наряду с высокой применяется и более низкая частота поля возбуждения преобразователя – порядка нескольких килогерц. При этом контроль проводится не по амплитуде выходного напряжения преобразователя, а по амплитуде пятой гармонической составляющей этого напряжения, т.е. при частоте синусоидально-

го поля возбуждения, равной F . Контроль проводится по амплитуде напряжения, имеющего частоту $5F$, которое выделяется резонансным усилителем из выходного напряжения преобразователя.

Как показали исследования, при относительно низкой частоте поля возбуждения процентное изменение амплитуд высших гармонических составляющих выходной ЭДС накладного преобразователя при перемещении преобразователя с бездефектного участка гильзы на участок с трещиной намного (часто в разы) превышает такое изменение, которое наблюдается с амплитудой выходного (суммарного, не раскладываемого на гармонические составляющие) напряжения преобразователя.

Другими словами, в этом случае чувствительность амплитуд высших гармонических составляющих к дефектам оказывается намного больше, чем амплитуды суммарного выходного напряжения накладного преобразователя трансформаторного типа.

Способ измерения по амплитуде пятой гармоники не отличается от того, который применяется при измерениях по амплитуде суммарного выходного напряжения преобразователя – после амплитудного детектора напряжение поступает на вход фильтра верхних частот, после чего проводится анализ сигнала на его выходе.

Достигнутый результат. Правильность выбранных научных и технических путей для решения проблемы обнаружения дефектов сплошности материала гильз цилиндров дизельного двигателя подтверждена опытом эксплуатации дефектоскопа на Минском моторном заводе, где в настоящее время проводится 100 %-ный контроль изготавливаемых на этом заводе гильз.

Пример участка гильзы цилиндра с дефектом в виде сквозной трещины, обнаруженной разработанным дефектоскопом, показан на рисунке 3 (излом гильзы на том участке, где находится трещина). Она имеет более темный цвет относительно участка, где до проведения излома был сплошной металл и который на рисунке выглядит более светлым участком.

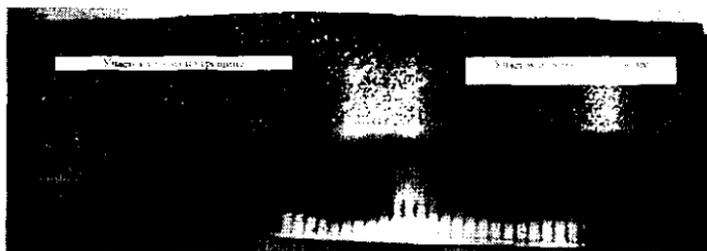


Рис. 3. Излом участка гильзы цилиндра с трещиной

Можно отметить, что в данном случае трещина была совершенно неразличима при визуальном осмотре гильзы. Это вызвано как малой шириной ее раскрытия, так и тем, что контроль гильзы цилиндра проводится после токарной обработки ее наружной поверхности и хонингования внутренней поверхности. В результате происходит так называемое завальцовывание краев трещины, что часто исключает ее обнаружение при визуальном осмотре.

Дефектоскоп обнаруживает трещины, глубина которых превышает 0,2 мм, и протяженность 5 мм.

Если в процессе сканирования гильзы цилиндра под каким-либо преобразователем обнаруживается дефект, то вращение гильзы прекращается, а на табло дефектоскопа (размещено на его лицевой панели, см. рис. 1) световой индикатор показывает, под каким преобразователем обнаружен дефект. Если он не виден при визуальном осмотре, то данная область гильзы цилиндра обследуется при помощи портативного дефектоскопа с накладным преобразователем карандашного типа, также изготовленного в ИПФ НАН Беларуси. В процессе сканирования в ручном режиме выделенного участка гильзы устанавливается точное место, где имеется дефект сплошности, и его протяженность.

Основная проблема при разработке дефектоскопа – способность различать сигналы от дефектов сплошности и от различных структурных неоднородностей, которые всегда присутствуют, как показали исследования, в материале гильз, изготавливаемых из высокопрочного чугуна.

Данный дефектоскоп может применяться и для обнаружения дефектов сплошности в ферромагнитных трубах различного диаметра. При этом возможно изготовление вихретокового дефектоскопа с автономным питанием, который при перемещении внутри трубы будет проводить контроль ее внутренней поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Герасимов, В.Г. Неразрушающий контроль: в 5 кн. / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков. – М.: Высш. шк., 1992. – Кн. 3: Электромагнитный контроль: практ. пособие. – 312 с.
3. Вихретоковый автогенераторный дефектоскоп: пат. Респ. Беларусь № 1939 / А.В. Чернышев, И.Е. Загорский.

PIMSLIDER – СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ТРУБОПРОВОДА. ГОТОВЫЕ РЕШЕНИЯ, ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ

И.Р. Махкин

ЗАО «Нефтегазсистема», Гомель, Беларусь

Введение. Главной и первостепенной задачей трубопроводной компании является обеспечение безопасной и надежной работы системы трубопроводов при наименьших затратах на поддержание жизненного цикла. Важным компонентом в обеспечении успешного выполнения этой задачи является наличие необходимой информации, компетентность и средства для *интегрированной обработки информации* на всех этапах процесса управления целостностью системой трубопроводов (Pipeline Integrity Management System (PIMS)). В данном случае и приходят на помощь информационные технологии.

Цели PIMS. Система PIMS должна продемонстрировать компетентным органам власти тот факт, что предпринимаются адекватные *управленческие и организационные мероприятия* в целях предотвращения и контроля аварий, ограничения их последствий для человека и окружающей среды, а также для доказательства наличия надлежащего планирования на случай чрезвычайной обстановки. Кроме того, система должна продемонстрировать, что *техническая безопасность и целостность всей системы* была достигнута путем надлежащего проектирования системы трубопроводов, эксплуатации оборудования, технического обслуживания и инспекций, основанных на согласованных высоких технических стандартах и нормах. Все эти виды стратегий, основанных на документах (бумажных носителях), сейчас готовы к внедрению в реальную систему контроля технологических процессов.

Цели системы PIMS:

- ежегодное подтверждение органам власти Лицензии на эксплуатацию с учетом остающихся угроз и проведенных за конкретный год мероприятий;
- доказательство и демонстрация фактической целостности путем проведения сравнения с предыдущими периодами времени;
- генерирование информации (путем легко проверяемых процессов) для отдела безопасности (как части внутреннего процесса верификации) и для компетентных органов власти;
- улучшение уровней качества и конфиденциальности используемых данных, так как они могут контролироваться из одного источника и, при

необходимости, распределяться по всей системе. Процессы должны быть прозрачными для каждого пользователя. что приведет к улучшению удобства сопровождения и непротиворечивости данных;

- возможность дифференцирования применяемых измерений и мероприятий для всей сети трубопроводов в зависимости от критериев и ключевых индикаторов производительности.

В целях решения этих задач разработана представляемая система PIMSlider, которая используется в настоящее время такими компаниями, как Gasunie (Нидерланды), SASOL GAS (ЮАР), Geoplin (Словения), RWE Transgas (Чешская республика), TOTAL TIGF (Франция).

Состав системы PIMS. Система контроля PIMS состоит из интерфейсов, баз данных, алгоритмов и критериев контроля, а также интерфейса «человек – машина» для работы с системой.

Система имеет простую и прозрачную внутреннюю структуру. Все данные о трубопроводе, включая информацию о конструкции, расположении, данные разнообразных инспекций и обследований, результаты расчетов и моделирования, хранятся в единой базе данных. База данных совместно с интерактивными интерфейсами, позволяющими эти данные просматривать и анализировать, составляют информационно-поисковую подсистему.

Управление данными:

- Вся информация о трубопроводах хранится в реляционной базе данных.
- Трубопровод и «особенности» на нем (задвигка, кожух, пересечение, дефект и т.д.) хранятся как отдельные объекты. Все объекты имеют регулируемый набор специфических атрибутов. Пользователь может получить информацию по любому объекту трубопровода из таблицы, либо непосредственно с карты.
- Поддерживается ручной ввод, хранение, редактирование и извлечение всех данных.
- Поддерживается загрузка разнородной цифровой информации:
 - данные внутритрубных обследований (Flaw List – отчет о дефектах и Raw Data – двоичные данные);
 - измерения ЭХЗ;
 - наземные измерения на трубопроводе, включая функцию привязки этих данных к соответствующему положению трубопровода (координаты географической карты) или объектам трубопровода;
 - другие данные, необходимые для проведения анализа состояния трубопроводов и представленные в цифровом виде.
- Доступ к данным и их анализ осуществляется при помощи полностью синхронизированных графических интерфейсов, таких как программы просмотра таблиц карт и графиков.

- Пользовательские запросы – пользователь может осуществить выборку необходимой информации из базы данных путем самостоятельного построения запросов, например, следующего типа:

- перечень всех пересечений с дорогами (или железными дорогами) без кожухов и предупредительных знаков, где глубина залегания трубы не превышает 0,8 м;

- перечень всех мест, где присутствуют дефекты определенного типа и минимальное расстояние до зданий не отвечает требованиям стандартов.

Контроль целостности трубопроводов осуществляется аналитической подсистемой, которая представляет собой расширяемый набор приложений (программ), объединенный общей базой данных, едиными методами доступа к информации, ее представления.

При этом выполняется анализ результатов внутритрубных инспекций:

- выполняется оценка механической прочности (B31G, RSTRENG);
- поддерживается выбор участка поверхности трубопровода для проведения исследования и учитывается влияние близости дефекта на остаточную прочность сегмента трубопровода.

Анализ дефектов:

- Создается 3-х мерное изображение любых дефектов на основе двоичных данных внутритрубного обследования.

- Расчет скорости роста дефектов по результатам последовательных инспекций.

- Прямые измерения – оценка дефекта с использованием метода конечных элементов. При этом используются файлы, полученные при прямом измерении геометрии дефекта.

- Моделирование – анализ предельных значений для определения устойчивости при ухудшении условий эксплуатации трубопровода или непрерывной эксплуатации, принимая в расчет текущие или будущие условия эксплуатации.

- Оптимальный ремонт – автоматическое составление перечня необходимых ремонтов, который используется для оценки стоимости и ресурсов.

Анализ состояния катодной защиты:

- Определяется степень потенциальной коррозионной опасности для любой секции трубопровода с учетом влияния агрессивной среды, отрицательных антропогенных факторов, типа изоляции, сопротивления грунтов и др.

- Определение защищенности по протяженности и во времени.

- Определение состояния изоляционного покрытия – при наличии результатов детальных обследований трубопровода (измерения шаговых потенциалов, измерения приборами UpScan, MoData).

- Моделирование режимов работы СКЗ путем изменения силы тока, потенциалов в точках дренажа.

- Сопоставление с данными внутритрубных инспекций и других видов обследований.

Оценка рисков:

- Выполняется анализ опасности теплового повреждения (взрыва) трубопровода с учетом распространения дисперсионного шлейфа.

- Оценка последствий повреждения в любой точке трубопровода с учетом расстояния до зданий, плотности населения.

- Выполняется оценка относительного, индивидуального и социального рисков в любой точке магистрали трубопровода.

- Определение приоритетов зон риска.

Результаты работы аналитической подсистемы являются основой для работы подсистемы принятия решений. Эта подсистема предназначена для экспертов в области целостности трубопроводов и обеспечивает выбор оптимальной стратегии проведения ремонтов трубопровода, определение периодичности их обследования. При этом учитываются следующие данные:

- Механическая прочность. Учитываются как дефекты, обнаруженные при внутритрубных инспекциях, так и при шурфовании трубопровода.

- Степень коррозии в расчете на дефект.

- Минимально требуемая механическая прочность.

- Экономические критерии (затраты).

- Расходы на проведение инспекций по типам (**изыскания, внутритрубное обследование**).

- Стоимость ремонта в расчете на дефект.

- Стоимость замены трубопровода.

- Штраф в случае аварии.

- Штраф за утрату контракта.

- Представление сопутствующих расходов предприятия.

- Экономические критерии (экономия):

- экономия от отложенных ремонтов;

- экономия на расходах на проведение инспекции вследствие своевременного (раннего) ремонта;

- экономия на расходах на ремонт вследствие проведения своевременной (ранней) инспекции;

- экономия на общих расходах на техническое обслуживание вследствие своевременной замены оборудования. Предварительно определенных уровней риска, которые влияют на предпочтительность момента ремонта.

При выборе метода ремонта учитываются обеспечение сохранения необходимой нагрузочной способности трубопровода с минимальной стоимостью ремонта.

Программное обеспечение. PIMSlider – это пакет программ, предоставляющий следующие возможности по контролю за состоянием трубопроводов:

- Управление данными.
- Базовая ГИС-функциональность.
- Навигация – обеспечивает навигацию вдоль трубы, подсвечивает объекты трубопровода (включая сам трубопровод) на карте и показывает атрибутивные значения этих объектов.
- Позиционирование – может представить детальную информацию о выбранном с карты объекте. Поддерживает функцию одновременного измерения масштаба изображения карты и других графических окон.
- Расстояние – обеспечивает расчет расстояния между 2 точками, выбранными пользователем на карте.
- Координаты – рассчитывает координаты (в координатах GIS) в любой точке карты в зависимости от положения курсора на карте.
- Дистанция – рассчитывает значение «дистанции» по трубе в зависимости от положения курсора на трубопроводе.
- 3D-изображение – может представлять систему трубопроводов в 3-х мерном изображении, включая такие функции, как скролинг, масштабирование и вращение; объекты на трубопроводе, включая дефекты, представляются в 3-х мерном изображении согласно угловому положению, указанному в отчете.
- Функции поиска – можно использовать для нахождения местоположения на карте. Например, поиск по почтовому индексу, кодам объектов или номеру чертежа и позиционирование по определенным координатам X, Y и GPS.
- Увеличение/уменьшение масштаба изображения до карты с общим видом страны.
- Мониторинг, анализ и моделирование системы катодной защиты (включая вопросы, связанные с блуждающими токами).
- Анализ данных внутритрубного обследования, используя либо Flaw List (перечень дефектов), либо двоичные данные; сравнение внутритрубных инспекций, проведенных в разное время (и возможно, разными исполнителями) по одному участку трубопроводов.
- Оценка дефекта (механика разрушений, например B31G, RSTRENG, стандарт Gasunie).
- Расчеты рисков (индивидуального и социального) и представление уровней риска всех трубопроводов.

- Установление приоритетов проведения инспекций, исходя из контуров риска.
- Расчет целостности трубопроводов, на которых невозможно проводить внутритрубные обследования, с использованием технологии Direct Assessment (DA).
- Оценка экономических вопросов (расчет остаточного ресурса, оптимизация жизненного цикла).

Программное обеспечение PIMSlider включает в себя следующие модули:

Slider4PIMS – обеспечивает хранение всех данных, относящихся к трубопроводу: координаты трубопровода, профиль, пересечения, грунты, запорная арматура, плотность населения вдоль трассы трубопровода, средства и обследования ЭХЗ, данные внутритрубной диагностики, статистика по ремонтам и авариям, мультимедийные документы (фотографии, схемы, чертежи и т.д.); поддерживает механизм многокритериальных запросов для доступа к базе данных и имеет развитые средства визуализации, графической интерпретации информации и генерации отчетов (рис. 1).

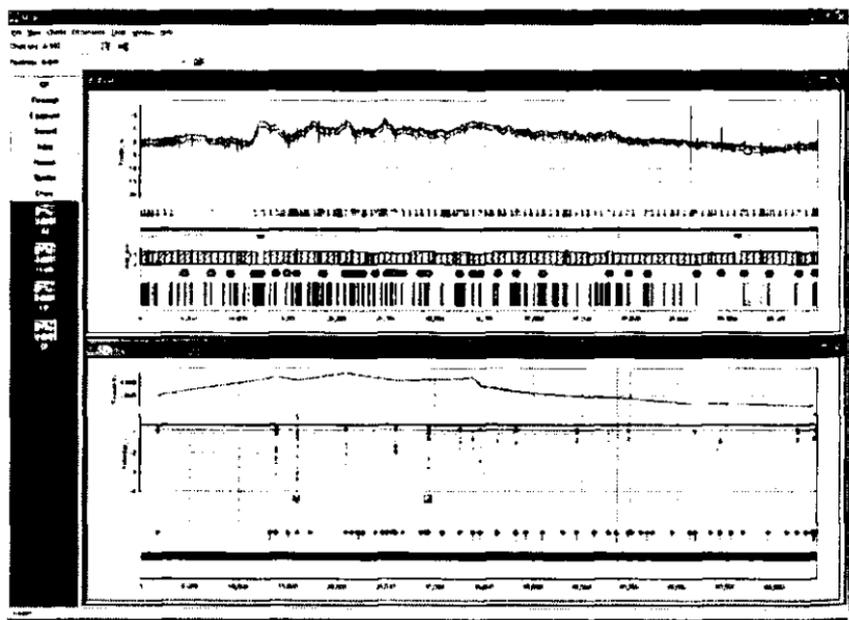


Рис. 1. Графическая интерпретация объектов трубопровода

Slider4PIMS используется для ввода, отображения, поиска, и изменения информации. Программа связывает между собой данные, полученные из различных источников, таких как геодезические съемки, данные внутритрубного снаряда и замеры потенциалов ЭХЗ. Оператор может отслеживать связи между различными фактами и цифрами, а также планировать свою деятельность (обследования, ремонт, техническое обслуживание) исходя из комплексного анализа всей информации, хранящейся в системе. Это позволяет оператору проводить интегрированный анализ имеющихся данных, обнаруживать скрытые тенденции и принимать решения в части эксплуатации трубопровода.

PipeSafe Lite (PSL) – прошедший международную сертификацию пакет программного обеспечения количественной оценки рисков и опасностей (рис. 2), основанный на подходах PipeSafe (технология расчетов рисков для газопроводов, разработанная группой международных газотранспортных компаний). При задании таких параметров, как диаметр трубопровода, толщина стенки, тип материала, рабочее давление и глубина залегания, модуль рассчитывает частоту возникновения аварии на конкретном трубопроводе.

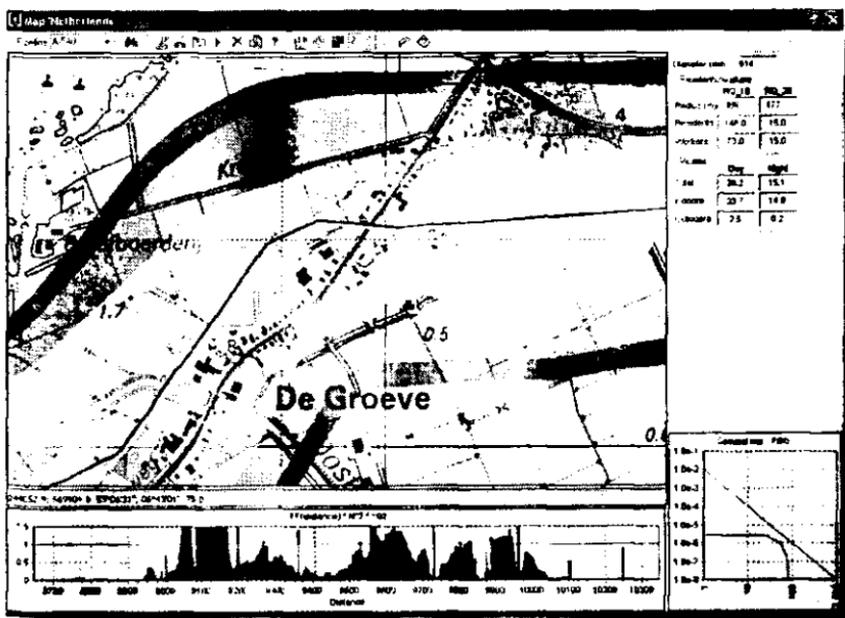


Рис. 2. Оценка частоты возникновения аварий

PSL – рассчитывает летальность и значение риска (учитывая частоту возникновения аварий), используя географическую структуру в окрестностях трубопровода и демографическую информацию (расположение и тип зданий, количество присутствующих людей).

Выход *PSL* поддерживается географическими представлениями трассы трубопровода, включая контуры риска. Подсвечиваемые места (или полные трубопроводы), где превышены предварительно заданные цифры риска, дают возможность инженеру выявить причину определенной проблемы и предложить различные решения ее преодоления.

Индивидуальный риск (ИР) зависит от частотности аварий и последствий воспламенения вследствие разрыва трубопровода.

Последствия для населения рассчитываются в соответствии с CPR 16E (Методика определения возможного ущерба, 1992) и CPR 18E (Руководство по количественной оценке риска 1999).

Частотность аварий зависит от диаметра, толщины стенки трубы, типа стали, ударной вязкости по Шарпи (на образцах с V-образным надрезом), внутреннего давления, защитных мероприятий и глубины залегания.

Контуры ИР 10^{-6} (требование законодательства) строятся вдоль трассы трубопровода (внутри этих контуров можно видеть здания).

Социальный риск (СР) определяется как частотность F из N или более смертельных исходов на км в год. Рассчитывается в соответствии с CPR 16E (Методика определения возможного ущерба, 1992) и CPR 18E (Руководство по количественной оценке риска, 1999).

CM-Expert дает возможность оператору проводить оценку коррозионной обстановки вдоль трассы трубопровода с учетом влияния агрессивной среды или отрицательных антропогенных факторов, вскрывать опасные тенденции при определении уровня защищенности трубопроводов и анализировать эффективность существующей системы катодной защиты с использованием режима моделирования ее параметров (рис. 3).

InPipe – модуль, предназначенный для анализа любых видов дефектов трубопровода и других особенностей на основании данных, представляемых внутритрубными снарядами различных фирм. Во-первых, решается задача привязки дефектов, что обеспечивает точное позиционирование данных внутритрубного снаряда на трехмерной модели трубопровода. Динамическое растягивание/сжатие данных внутритрубного снаряда обеспечивает достаточно реальное соответствие положения всех особенностей на существующем трубопроводе.

Реализация оптического скопирования такими способами наряду с информационно-технологическими преимуществами отличается существенными информационно-физическими ограничениями.

Для видеоскопической техники с ее пространственными возможностями визуального контроля и дистанцирования изображений на большие расстояния особую проблему составляет синхронное продвижение видеоприемника и излучателя внутри протяженных и изогнутых полостей. При этом дистанционная ориентация приемника изображений должна обеспечивать оперативность управления как процессами ориентации в ограниченном пространстве, так и спектрально-энергетическими параметрами излучателя и всей системы видеоскопирования, в том числе контроль за манипуляцией изображениями, артикуляцией, операциями, обновлением программ и т. д.

В современных видеоскопах с ручным управлением и видеокроулерах с автономными приводами применяются различные приспособления для контрактного перемещения приемника изображения и излучателя относительно контролируемой поверхности (рис. 2).

Для панорамной ориентации приемника изображения и осветителя используются разнообразные центрующие устройства с набором сменных насадок (рис. 2, а). В отдельных конструкциях видеокроулеров подвижное шасси с приводными роликами дополняется устройством ориентирования приемника и излучателя. С помощью такого устройства приемник с излучателем могут синхронно осуществлять возвратно-поступательное перемещение с некоторым поворотом для бокового осмотра.

Для контроля протяженных изделий с изменяющимися профилями приемник и излучатель базируются на самодвижущейся тележке с приводными роликами и шарнирно подпружиненными ползьями с упорными роликами (рис. 2, б).

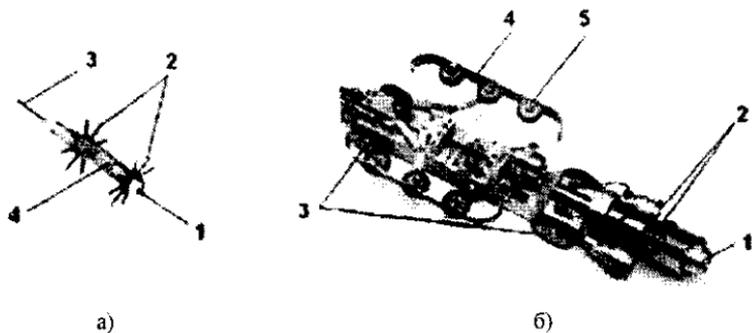


Рис. 2. Конструктивные схемы механизмов видеокроулеров

Разрабатываемые и производимые Белорусско-Российским университетом совместно с УП «Белгазпромдиагностик» системы визуального контроля адаптированы к специфике объектов трубопроводного транспорта.

Основополагающий принцип «три в одном» обеспечивает некоторую многофункциональность применительно к скопированию внутренних поверхностей протяженных изделий, пространств, вертикальных шахт и колодцев, досмотра транспортных средств, тары и внутренних полостей с целью быстрого поиска скрытого содержимого для ряда специальных целей.

Блочно-модульное исполнение устройств единой системы оптического скопирования позволяет реализовывать различные комбинации видеоскопов применительно к задачам потребителя (рис. 3).

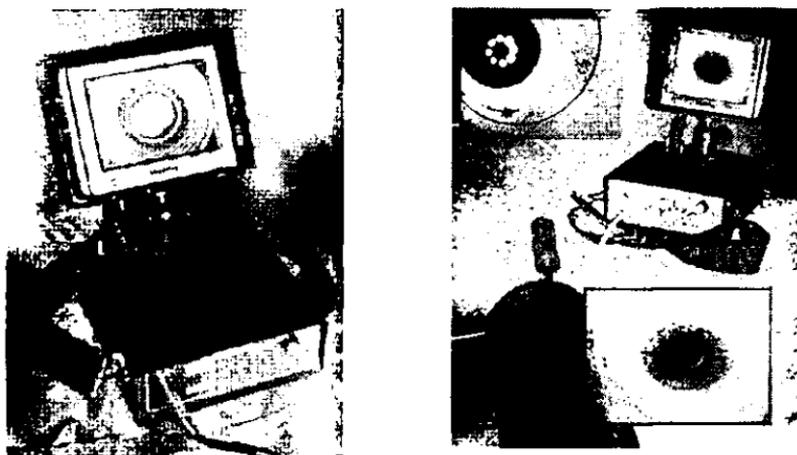


Рис. 3. Общий вид устройств отображения многоцелевых видеоскопов

Три типа видеомодулей оснащены гибким кабелем, полужестким кабелем или телескопической штангой, что позволяет видеоскопировать поверхности различных по габаритам и конструктивному исполнению изделий.

Наряду со специфическими системами скопирования объектов трубопроводов, средства визуального осмотра и наблюдения находят применение для оперативного контроля теплообменников и отопительных систем, парогенераторов и турбин, танкеров и судов, объектов различных видов транспорта, холодильников и рефрижераторных систем сборных пунктов промышленных сетей трубопроводов. Особую эффективность обеспечивают техника и технологии скопирования в авиационной и космической промышленности, энергетике, перерабатывающей промышленности: пере-

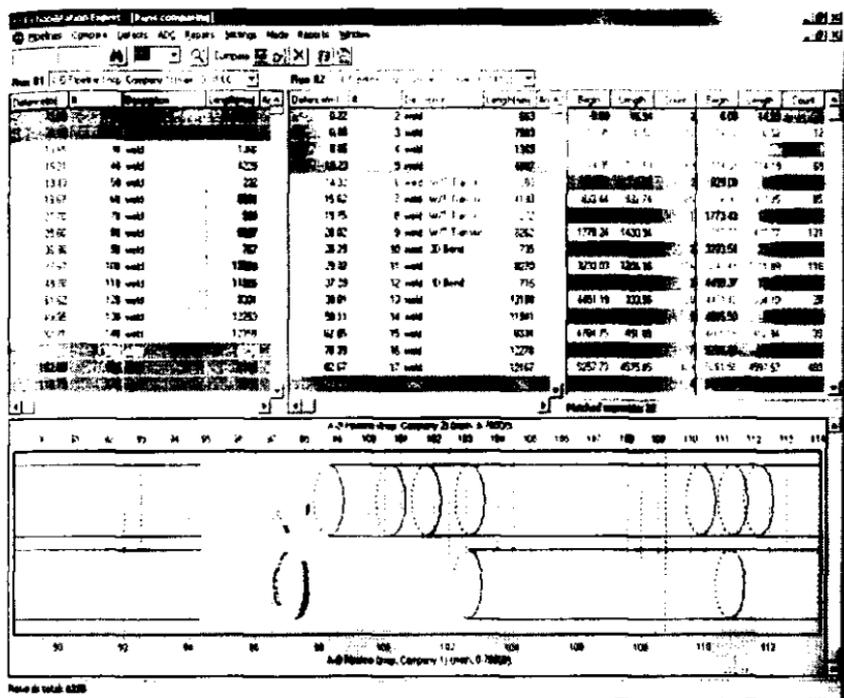


Рис. 5. Сравнение пропусков

Любой специалист, занимающийся анализом данных внутритрубной инспекции, имеет представление о том, сколько усилий требует работа по сравнению двух наборов дефектов, число которых может достигать нескольких тысяч.

Поскольку скорость роста коррозии является ключевым фактором для определения временного интервала между проведением инспекций, указанная функциональность модуля **Rehab** (которая значительно улучшает точность значений скорости роста коррозии) дает возможность оператору оптимизировать экономические аспекты своей программы инспекций, что в свою очередь позволяет сэкономить значительные денежные средства.

Выбор надлежащей программы ремонта будет соответствовать правилам, определяемым самим пользователем (рис. 6).

том «Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных трубопроводах. РД. Госгортехнадзор России. Москва. 2000».

Заключение. Система PIMSlider позволит трубопроводной компании организовать единое информационное пространство, проводить комплексный анализ технического состояния, оценивать риски эксплуатации, рационально планировать ремонты. Система может быть использована и как сложный инструмент высококвалифицированных экспертов, и как специализированная информационная среда для персонала служб эксплуатации и высшего руководства.

PIMSlider реализует процедуры и подходы, описанные в группе стандартов ASME B31.8S.

В настоящее время система PIMSlider используется для оценки технического состояния всех своих газопроводов одним из крупнейших операторов газотранспортных сетей Европы – компанией Gasunie (Нидерланды), компанией SASOL GAS (Южная Африка) для всех магистральных газопроводов страны, газопроводов других, в основном европейских, операторов транспорта газа.

УДК 681.586

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБ

С.С. Сергеев¹, А.П. Марков¹, А.В. Иванов², В.А. Левчук²

¹ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь,
²УП «Белгазпромдиагностика», Минск, Беларусь

Рассматриваются методы и средства визуально-оптической дефектоскопии труднодоступных поверхностей объектов трубопроводного транспорта на основе техники и технологий оптической интроскопии, включая линзовые и световодные эндоскопы, бороскопы и другие аппараты скопирования. Особое внимание уделяется системам видеоскопирования, отличающимся высоким уровнем автоматизации сканирования и микропроцессорной обработки первичной информации.

В условиях значительно усложняющейся техники трубопроводного и других видов транспорта, особое значение приобретают аппаратура и технологии оперативного контроля их текущего состояния. Ресурс работы, эксплуатационная надежность и технологичность объектов контроля огра-

ничены несовершенством конструкций, неравнопрочностью материалов по отдельным участкам, дефектами изготовления и сборки, нарушениями режимов и целым рядом других факторов [1].

Модернизация и реконструкция ряда производств с поэтапным переходом на более совершенные технологии представляет особую проблему информационно-технологической адаптации к реальному оборудованию и условиям эксплуатации.

В условиях периодических испытаний при монтаже и профилактических осмотрах при эксплуатации особое внимание уделяется анализу состояния и своевременному выявлению причин, обуславливающих появление различного рода дефектов и отказов. Установить имеющиеся разнообразные и многофакторные причинно-следственные связи в процессе разработки, доводки и испытаний новой техники и технологий весьма сложно и проблематично. В то же время ряд причин появления технологических отклонений, не поддающихся прогнозированию в условиях эксплуатации, обуславливают различные критические и аварийные ситуации.

Статистические методы создают возможность корректировки конструкторско-технологической документации и режимов работы, но существенно не решают проблемы эксплуатационной надежности. Применение статистических методов связано со значительными финансово-экономическими затратами и существенно увеличивает сроки испытаний, опытной эксплуатации и диагностирования.

С усложнением техники и технологий все большее значение приобретают аппаратное и методическое обеспечение контролеспособности транспортных объектов, в том числе и трубопроводных. В полевых условиях эксплуатации функциональная значимость аппаратного обеспечения существенно возрастает, так как текущие расходы на обнаружение и ликвидацию последствий эксплуатационных дефектов и отказов составляют внушительные размеры. К этому добавляются и проблемы экологической безопасности.

В совершенствовании аппаратных средств и решении задач обеспечения контролеспособности объектов трубопроводного транспорта объединяется весь комплекс физических воздействий и информационных взаимосвязей с учетом характерной пространственно-временной специфики таких объектов.

В информационно-метрологическом обеспечении контролеспособности особое значение имеет выбор методов, средств и технологий для мобильного оперативного контроля, макетных проверок, лабораторных и промышленных испытаний, апробации и сертификации.

Несовершенство приборного и метрологического обеспечения, конструктивные и эксплуатационные особенности объектов трубопроводного

транспорта ограничивают возможности оперативного применения техники и технологий неразрушающего контроля. Неразрушающий контроль решает информационно-дефектоскопические задачи методами визуализации изображений внутренних поверхностей. Но в любом случае весь алгоритм визуализации строится на физико-оптическом представлении визуального отображения реального состояния исследуемой зоны, адаптированного к оператору, требованиям и условиям эксплуатации.

Характерное для трубопроводного транспорта многообразие объектов дополняется повышенными требованиями к надежности и достоверности при разнообразии размеров и форм сопрягаемых внутренних поверхностей. Ими обуславливаются и соответствующие технологии, и средства аппаратно-технологического обеспечения дефектоскопии и диагностики. При этом могут статистически прогнозироваться виды и пространственное расположение отдельных дефектов с учетом их характера и причин возникновения (коррозия, пластические деформации, нарушения сплошности, экстремальный выход из допусков и т.д.).

В конструкции и материалах отражаются физико-технические особенности и физическая сущность происходящих в трубопроводных объектах явлений и процессов. Визуальное выявление таких зарождающихся отклонений предполагает операционное скопирование наблюдаемых участков труднодоступных поверхностей. То есть путем скопирования получается как бы фотографическое отображение реального состояния воспринимаемого среза в контролируемых пространственно-временных координатах.

Различные методы и средства визуального представления пространственно-временного распределения информационно-физических параметров контролируемой поверхности используют более эффективные излучения и их источники [2 – 4]. Однако более комфортными, биологически и эргономически адаптированными к зрительному восприятию являются оптические. Оптико-электронная интроскопия труднодоступных и невидимых невооруженным глазом внутренних поверхностей позволяет расширить диапазон практического применения дефектоскопии в технике и технологиях трубопроводного транспорта.

Структура оптической интроскопии определяется характером информационных процессов в технологическом контроле и дефектоскопии обследуемых объектов. При наблюдении оператором с помощью технических средств непосредственно воспринимается изображение рассматриваемого участка. Но при контроле и измерениях уже на первичном уровне выполняются простейшие информационно-преобразовательные операции.

Если наблюдение за объектом предполагает осмотр оператором заданного пространства и скопирование его поверхности, то при выполнении

контрольно-измерительных операций оптическое отображение копируемой зоны сопоставляется с эталоном (образцом) или с мерой физической величины. В большинстве современных технологий производится визуальный обзор с выявлением некоторых аномальных ситуаций, не предусмотренных нормативными требованиями (нарушения сплошности, обрывы тяг и проушин и т.д.).

Информационно-преобразовательные операции при контроле позволяют обработать копируемое изображение и путем простейших сравнений отклонений (размеров, форм, рельефа, цвета) по концептуальной модели дефектоскопировать воспринятое отображение поверхности. С помощью несложных оптических средств при контроле копируемое изображение приближается к оператору, чтобы он был в состоянии его воспринять и дать качественную оценку состояния и свойств обследуемого участка. В отличие от контроля при измерениях, в копируемое изображение вносится изображение меры, что позволяет количественно оценить характер воспринимаемого отклонения в абсолютном или относительном выражении.

Всякое копирование контролируемых объектов связано с выполнением операционно-поисковых и информационно-физических действий.

При выполнении контрольно-измерительных операций в некотором пространственно-временном распределении выявляются специфические зоны, участки, диапазоны с наличием определенных или неопределенных технологических отклонений, и за счет «копирования» их изображений имеется возможность дальнейшей локализации, дистанцирования и отображения этой «копии» в формализованном виде, приближенном к получателю (потребителю).

Особую сложность в копировании изображений (отображений) материальных объектов представляют труднодоступные поверхности сложно-профильных полостей (каналов), крупногабаритные и длинномерные изделия с изгибами и ответвлениями, которые создают дополнительные трудности в решении задач копирования. Но в любом случае система копирования должна быть адаптирована к реальным условиям и реальным объектам, чтобы эффективно выявлять и достоверно оценивать зарождающиеся отклонения в их нормированных пространственно-временных координатах и свойствах.

Возможности современных методов и средств оптической интроскопии ограничены структурой каналов по преобразованию и передаче оптических излучений. Жесткость линзовых смотровых приборов и гибкость волоконно-оптических эндоскопов определяют их технологические возможности в дефектоскопии объектов трубопроводного транспорта. Есл

линзовые смотровые трубки обеспечивают хорошее разрешение на расстояниях до 10 метров, то технологии световодов при своей гибкости конструкции ограничивают длину (1...5 м) и разрешающую способность средств оптического скопирования (50...2,0 лин/мм). Однако сверхтонкими световодными аппаратами можно осмотреть поверхности с малыми размерами отверстий и криволинейными каналами прохода приемной части к требуемым зонам.

Промышленные фиброскопы с дистанционным управлением продвижения приемника изображения позволяют проникать по весьма сложным извилистым траекториям и даже до таких участков, которые были бы недоступны без частичной или полной разборки контролируемого объекта.

Современная техника и технологии оптического интроскопирования располагают большим арсеналом промышленных устройств, отличающихся функциональным назначением, массогабаритными параметрами, уровнем автоматизации и стоимостью (рис. 1).

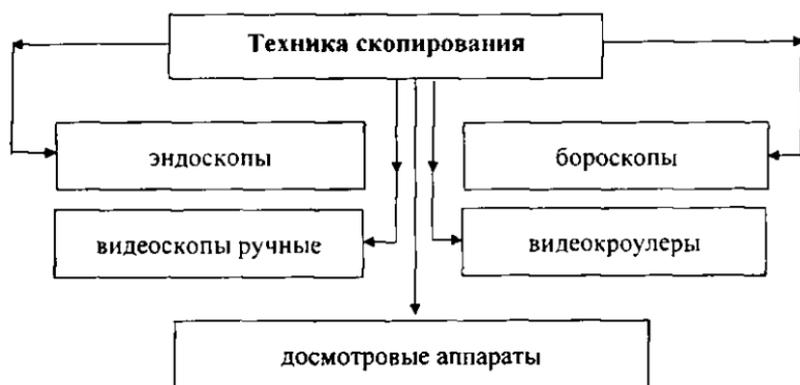


Рис. 1. Типы промышленных устройств оптического интроскопирования

Бороскопы (фокусирующие) и минибороскопы характеризуются встроенными фокусирующими устройствами, позволяющими получать резкое изображение от крупного плана до бесконечности.

Многообразие типов и конструкций промышленных устройств обеспечивает многофункциональный выбор средства применительно к задачам осмотра и анализа через технологические каналы ограниченных сечений (лючки размером менее 1,7 мм).

Автономные блоки питания повышают мобильность эндо-, боро-, и фиброскопов, а наличие всевозможных принадлежностей (фото- и кино-

техника) позволяет документировать изображения контролируемых поверхностей.

Разновидностью средств оптического скопирования являются электронно-оптические приборы. В структуре электронно-оптических эндоскопов предусматривается персональный компьютер, воспринимающий отображение наблюдаемого места через тонкий зонд. С гибкого зонда цветное изображение дистанцируется на миниатюрную цифровую ПЗС-камеру с автоматическим фокусированием. Встроенная в гибкий зонд ПЗС-камера воспринимает изображение недоступных для невооруженного глаза мест в реальном времени. Световодная подсветка с регулируемой яркостью создает эффективную освещенность без искажений в цветопередаче. Проложенный внутри зонда кабель обеспечивает питание камеры, подсветку наблюдаемого места и передачу изображения через интерфейс на компьютер. За счет адаптера-насадки изменяется угол обзора от прямого до 135 град. Таким путем обеспечивается визуальный контроль, например, клапанов механизма газораспределения четырехтактного двигателя и верхней части камеры сгорания.

Для вывода и обработки изображений имеется программное обеспечение, совместимое с операционной системой Windows. В режимах управления предусматривается также и ручное управление изображениями: ручная регулировка яркости (усиление) и время экспозиции. Манипуляции изображением обеспечивают выполнение операции стоп-кадр одной кнопкой с полным или разделенным экранами. В некоторых системах предусматривается контроль артикуляции во всех направлениях: управление/остановка, «Home», плавно или грубо. Управление источником излучения, обновление программы, в том числе и в полевых условиях, а также дистанционное управление скопированием улучшает эргономики и культуру обслуживания таких средств [5, 6].

В настоящее время бурно развиваются методы и средства оптической видеоскопии. Их дистанционные и телеметрические возможности значительно превосходят характеристики технической эндоскопии. Существующие способы видеоскопирования основаны на пространственно-временной взаимосвязи операций воздействия излучения на материальную поверхность, формирование и локализацию изображения наблюдаемой зоны, каналирование и передачу на расстояние, отображение и программно-алгоритмическую обработку в реальных или фиксируемых пространственных координатах. Такие способы оптического скопирования предполагают непрерывное пространственное сканирование материальной поверхности с масштабированием и микропроцессорной обработкой.

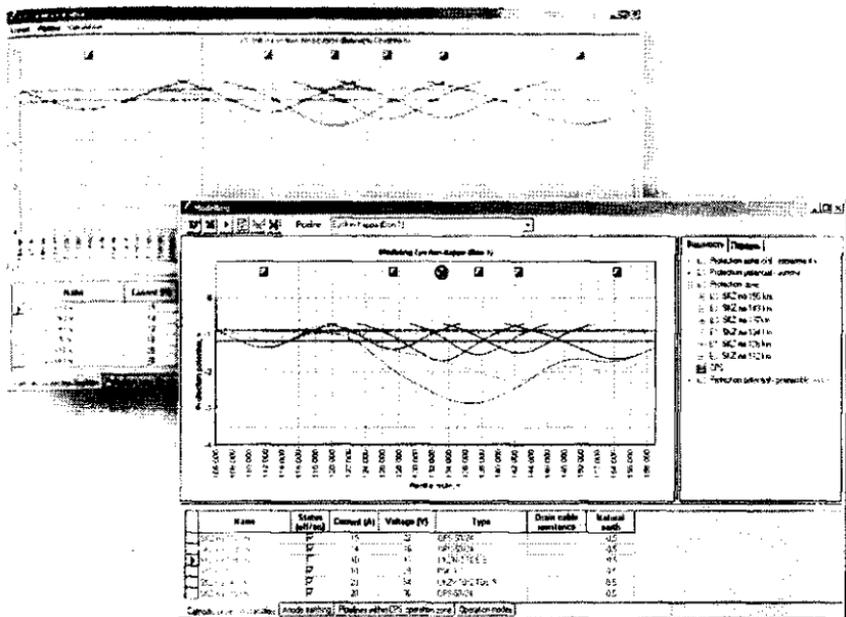


Рис. 3. Моделирование режимов работы системы катодной защиты

Оценка дефектов в *InPipe* (которые были обнаружены внутритрубным снарядом) основана на научных концепциях механики разрушения.

InPipe поддерживает расчет остаточной прочности трубопровода (рис. 4), определяемого различными стандартами: ANSI/ASME B31G-1991 и стандарт Gasunie.

Вышеуказанная функциональность по интерпретации двоичных данных позволяет проводить автоматический расчет остаточной прочности, используя менее консервативный метод, который по своей сути приближается к расчетам *Rstreng*. Это позволит получить экономию средств путем разработки программ отложенных ремонтов наряду с поддержанием требуемого уровня безопасности трубопровода.

Модуль *InPipe* является уникальным средством, дающим возможность оператору иметь оперативный доступ к данным, удобно их просматривать, определять проблемные области и переключаться на крупный план просмотра выбранных дефектов.

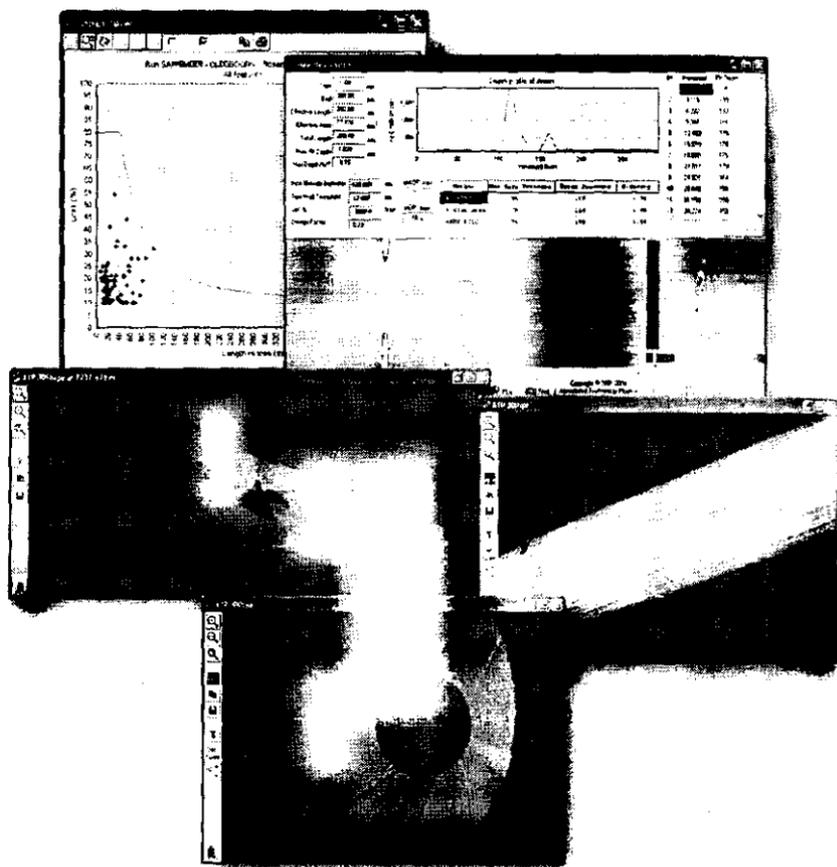


Рис. 4. Остаточная прочность трубопровода

Rehabilitation Expert обеспечивает формирование стратегии ремонтов по данным внутритрубных обследований на основании линейной модели роста коррозии и используемых у Заказчика стандартов механики разрушений.

Наиболее востребованной функцией программы Rehab является возможность сравнения пропусков, последовательно проведенных на одном участке (рис. 5).

гонка, offshore, химическая, нефте- и газотранспортировка, судоходство, таможенных и других органах [5, 6].

Достоверность и производительность визуального эндо- и видеоскопирования в большей мере зависит от того, насколько адаптированы эти средства и технологии непосредственно к условиям эксплуатации объектов трубопроводного транспорта. Как сечения, форма (рельеф) поверхности, так и ее состояние влияют на отражательную способность и проявляемость нарушений сплошности и, в конечном итоге, снижают выявляемость потенциальных дефектов оптико-электронной системой визуализации.

Методами сканирования и стробирования расширяются функциональные возможности и улучшаются тактико-технические характеристики эндо- и видеоскопов, что особенно значимо при использовании современной элементной базы оптико-электронной и микропроцессорной техники.

Комплексное (системное) объединение преимуществ с учетом ограничений современных средств и технологий позволяет эффективно решать задачи технологического контроля внутренних поверхностей на основе комбинированных, адаптивных к условиям и параметрам объектов транспортного хозяйства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техника и технологии оптической визуализации внутренних поверхностей труб / С.С. Сергеев [и др.] // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Материалы 6-й междунар. науч.-техн. конф. – Новополюк: УО «ПГУ», 2007. – С. 186 – 188.
2. Сергеев, С.С. Волоконно-оптические системы технологического контроля динамических объектов: моногр. / С.С. Сергеев, А.П. Марков, В.В. Коннов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 193 с.
3. Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 1: Визуальный и измерительный контроль. – 560 с.
4. Неразрушающий контроль: в 5 кн. / Б.Н. Епифанцев [и др.]; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1992. – Кн. 4: Контроль излучениями: практ. пособие. – 321 с.
5. Плетнев, С.В. Волоконно-оптические методы и средства дефектоскопии: справ. пособие / С.В. Плетнев, А.И. Потапов, А.П. Марков. – СПб.: ЛИТА, 2001. – 312 с.
6. Бычков, О.Д. Контроль внутренних поверхностей / О.Д. Бычков. – М.: Энергия, 1975. – 120 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ БЕЗЭЛЕКТРОННОЙ МАГНИТНОЙ ИНДИКАЦИИ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

С.Г. Сандомирский, С.А. Ревяко

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
Минск, Беларусь*

Разработаны методические основы безэлектронной магнитной индикации толщины немагнитного покрытия на ферромагнитном основании. Показано, что диапазон измеряемых толщин составляет половину длины используемых стержневых постоянных магнитов, а чувствительность – 4...10 угловых градусов на миллиметр. Создан портативный автономный магнитный толщиномер защитного покрытия трубопроводов, позволяющий проводить измерения в жестких климатических условиях и под водой.

Введение. Продолжительность надежной эксплуатации магистральных трубопроводов во многом определяется толщиной защитного немагнитного покрытия, нанесенного на ферромагнитное основание трубы. Нарушения целостности трубопровода возможны вследствие недостаточной толщины нанесенного защитного покрытия, его повреждения или отслоения при прокладке, эксплуатации или ремонте.

При 100 %-ной влажности (под водой), при пониженных или повышенных температурах целесообразно отказаться от использования средств измерения и индикации толщины покрытия, подверженных влиянию окружающей среды – датчиков Холла и феррозондов, предполагающих применение электронных средств получения и обработки сигналов. Средством измерения в этих условиях может быть магнитная стрелка, а индицируемым параметром – угол ее поворота в суперпозиции магнитного поля, связанного с расстоянием до поверхности трубы, и поля, создаваемого в точке наблюдения дополнительным источником.

Постановка задачи. Цель работы – разработка научных основ безэлектронной магнитной индикации толщины немагнитного покрытия на

ферромагнитном основании и принципов создания портативных автономных магнитных толщиномеров защитного покрытия трубопроводов.

Методические основы использования угловых измерений в магнитном неразрушающем контроле разработаны в [1]. Получены аналитические выражения для напряженности и направления суперпозиции поля контролируемого объекта и поля дополнительного источника:

$$c = \sqrt{a^2 + 1 + 2\alpha \cos\theta}, \quad (1)$$

$$\varphi = \arccos \frac{1 + \alpha \cos\theta}{c}, \quad (2)$$

где $\alpha = A/B$; $c = C/B$ (A, B, C – модули соответственно векторов $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$); векторы \vec{A} и \vec{B} – составляющие магнитного поля контролируемого объекта и поля дополнительного источника в точке наблюдения; \vec{C} – вектор суммарного магнитного поля от суперпозиции векторов \vec{A} и \vec{B} ; θ – угол между векторами \vec{B} и \vec{A} ; φ – угол между векторами \vec{B} и \vec{C} .

В [1] проанализирована также для чувствительность изменения направления φ результирующего поля к изменению модуля измеряемого поля при воздействии поля помехи произвольной напряженности и ориентации.

Установлено, что оптимальное соотношение чувствительности, диапазона измерения и помехозащищенности метода достигается при выборе угла θ в диапазоне $120^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$.

Область максимальной чувствительности и практической линейности шкалы измерения при этом соответствует изменению модуля измеряемого поля в диапазоне от 0,5 до 1,5 модуля поля дополнительного источника в точке наблюдения.

Разрешающая способность шкалы измерения в области максимальной чувствительности составляет при этом примерно 1 % модуля измеряемого поля на угловой градус.

Анализ поля двухэлементной магнитной системы над ферромагнитным полупространством. Рассмотрим систему (рис. 1) из двух намагниченных ферромагнитных цилиндров [2], расположенных на расстоянии Z от ферромагнитного полупространства.

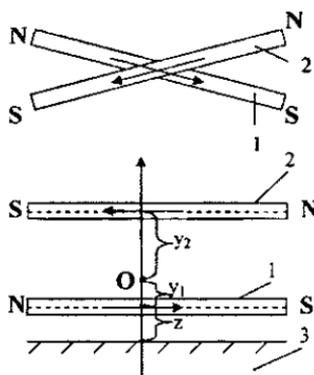


Рис. 1. Схема расположения (горизонтальная и фронтальная проекции) намагниченных цилиндров 1 и 2 относительно ферромагнитного полупространства 3: О – точка наблюдения; S, N – магнитные полюса цилиндров

Для унификации используемых аналитических выражений, не нарушая общности рассмотрения с точки зрения результатов анализа, для зависимости остаточной намагниченности M_d цилиндра длиной L и радиусом R , находящегося в остаточном намагниченном состоянии после намагничивания до насыщения от магнитных свойств (намагниченности насыщения M_s , остаточной намагниченности M_r и коэрцитивной силы H_c) его материала и коэффициента размагничивания N , воспользуемся полученной в [3] и экспериментально обоснованной в [4] формулой:

$$M_d = \frac{M_r(H_c + NM_r)}{2NM_r} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4M_r^2 NH_c}{M_s(H_c + NM_r)^2}} \right]. \quad (3)$$

Центральный коэффициент размагничивания N находящегося в остаточном намагниченном состоянии цилиндра из материала с магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$ при $\lambda = L/2R > 1$ может быть вычислен по аппроксимирующей формуле К. Вармутта [5]:

$$N = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - 1 \right] \frac{1 + 2,35 \ln(1 + 0,137\lambda)}{1 + 2,28 \ln(1 + 0,284\lambda)}. \quad (4)$$

Остаточный магнитный поток Φ_0 в центральном сечении цилиндра равен [4]

$$\Phi_0 = \mu_0 \pi R^2 J_a (1 - N), \quad (5)$$

а тангенциальная составляющая поля в окружающем цилиндр пространстве [6]:

$$H_z(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{\Phi_0}{\pi \mu_0 L^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \left[\frac{(1-c)k_1 A}{B^3} + ck_2 \left\{ \ln(A+B) + \frac{(-1)^{n+1}}{B} \right\} \right], \quad (6)$$

где

$$\bar{y} = \frac{2y}{L}; \quad \bar{x} = \frac{2x}{L};$$

$$A = \bar{x} + (-1)^n; \quad B = \sqrt{A^2 + \bar{y}^2};$$

$$k_1 = \sqrt{d^2 + 1}; \quad d = \frac{2R}{L}; \quad k_2 = 2 \left[k_1 - d^2 \cdot \ln \{ (1 + k_1) d^{-1} \} \right]^{-1};$$

c – параметр ($0 \leq c \leq 1$), характеризующий распределение остаточного магнитного потока вдоль цилиндра.

Пусть намагниченные цилиндры расположены (см. рис. 1) в параллельных плоскостях под углом θ друг к другу на оси, проходящей через центры цилиндров перпендикулярно их образующим.

Пусть y_1, y_2 – расстояния между точкой наблюдения O , расположенной на оси, соединяющей центры цилиндров, и, соответственно, центром источника дополнительного поля и центром контролируемого объекта.

Как установлено в [1], оптимальное соотношение чувствительности, диапазона измерения и помехозащищенности метода достигается при значениях угла θ между векторами измеряемого магнитного поля и поля дополнительного источника в диапазоне $120^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$.

Дальнейшее рассмотрение проведем для $\theta = 150^\circ$.

С учетом этого для ориентации φ суммарного поля относительно направления поля дополнительного источника получим из (1) и (2):

$$\varphi = \arccos \frac{1 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) a}{\sqrt{a^2 + 1 - \sqrt{3}a}}. \quad (7)$$

Поле каждого из цилиндров в точке наблюдения в зависимости от расстояния Z будет ослабляться в различной степени. Это приведет к зависимости угла поворота помещенной в точку наблюдения магнитной стрелки от расстояния системы цилиндров до полупространства. Эта зависимость может быть проанализирована с использованием (3)...(7) и метода зеркальных отображений [7].

Поле магнитных зарядов индуцированных намагниченным цилиндром на поверхности полупространства, можно представить как поле стержневого постоянного магнита, расположенного по другую сторону границы раздела на расстоянии $2Z$ от исходного магнита.

Поле магнитного изображения H_i постоянного магнита в системе координат, связанной с центром симметрии исходного стержневого постоянного магнита, рассчитывается по формуле [7]:

$$H_i = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \cdot H(x, y + 2z). \quad (8)$$

Результирующее поле $H_{\Sigma i}$ магнита вблизи ферромагнитного полупространства в точке (x, y) является суперпозицией полей исходного и «изображенного» магнитов:

$$H_{\Sigma i} = H(x, y) - \frac{\mu - 1}{\mu + 1} H(x, y + 2z). \quad (9)$$

На рисунке 2 приведена зависимость ориентации ϕ тангенциальной составляющей суммарного поля магнитной системы (см. рис. 1) от расстояния Z до ферромагнитного ($\mu \gg 1$) полупространства для трех различных длин L цилиндров с $R = 2$ мм из феррита стронция ($M_d \approx 310$ кА/м).

Графики построены без учета влияния отражения второго постоянного магнита и влияния полупространства на намагниченность первого (см. рис. 1) постоянного магнита.

Полученные результаты показывают:

- диапазон измеряемых расстояний от полупространства до нижнего цилиндра составляет примерно 1/2 длины используемых магнитов;
- чувствительность к изменению Z составляет при этом 4...10 угловых градусов на миллиметр.

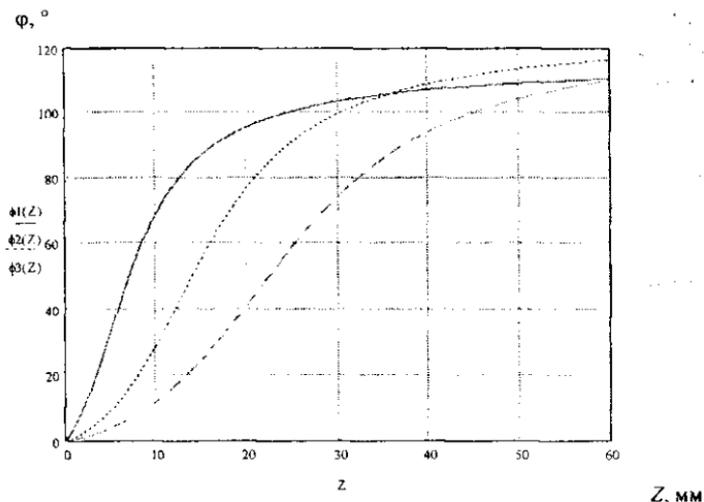


Рис. 2. Зависимость ориентации φ суммарного поля системы двух одинаковых цилиндров (по рис. 1) от расстояния Z до ферромагнитного полупространства
Примечание. Расчет по (3)...(7) при $c = 0$ для $y_2 = (L - 5)$ мм, $y_1 = 5$ мм для $L = 20$ мм (сплошная линия φ_1), 50 мм (точки φ_2) и 80 мм (пунктир φ_3).

Разработка безэлектронного магнитного толщиномера. На основании проведенного анализа изменения поля двухэлементной магнитной системы вблизи ферромагнитного полупространства предложен [8] принцип построения Безэлектронного магнитного толщиномера для магнитной индикации расстояния до ферромагнитной поверхности (рис. 3).

Для решения задачи повышения автономности устройства и расширения диапазона контролируемых толщин покрытий в сторону больших толщин в приборе магниты длиной L расположены в параллельных плоскостях на расстоянии h ($0,25L \leq h \leq L$) друг от друга. Магнитная стрелка закреплена на оси в пространстве между магнитами на расстоянии l ($0,1h \leq l \leq 0,5h$) от магнита, ближайшего к покрытию, а угол θ между направлениями намагниченности магнитов установлен 150° . Между магнитной стрелкой и контролируемым покрытием расположена шкала, проградуированная в единицах толщины покрытия и снабженная нониусом, имеющим возможность вращения вокруг оси.

В исходном состоянии вдали от ферромагнитного основания магнитная стрелка находится под действием суперпозиции магнитных полей, соз-

даваемых магнитами 1 и 2, и ориентируется в направлении, близком к направлению намагниченности магнита 1. Эта ориентация стрелки на шкале соответствует бесконечно большой толщине покрытия.

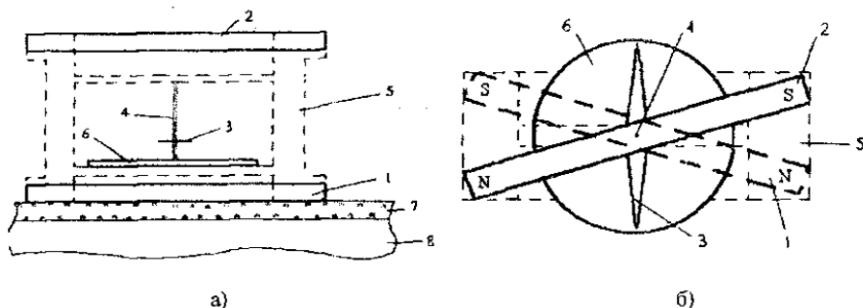


Рис. 3. Функциональная схема безэлектронного магнитного толщиномера в соответствии с [8] во фронтальной (а) и горизонтальной (б) проекциях: 1, 2 – стержневые постоянные магниты; 3 – магнитная стрелка; 4 – ось; 5 – немагнитный каркас; 6 – шкала для отсчета контролируемой толщины; 7 – немагнитное покрытие; 8 – ферромагнитное основание

Примечание. Буквами N и S обозначены торцы постоянных магнитов, соответствующие их северному и южному полюсам соответственно.

При установке прибора на свободную от покрытия поверхность ферромагнитного основания магнитное поле первого магнита 1 в плоскости расположения магнитной стрелки практически полностью компенсируется полем магнитных зарядов, индуцированных им на поверхности основания. В то же время магнитное поле второго магнита 2, находящегося при этом на расстоянии h ($0,25L \leq h \leq L$) от поверхности ферромагнитного основания, в плоскости расположения магнитной стрелки практически не изменяется. Поэтому стрелка при установке устройства на поверхность ферромагнитного основания ориентируется практически в направлении, близком направлению намагниченности магнита 2. Эта ориентация магнитной стрелки на шкале соответствует нулевой толщине покрытия.

При наличии немагнитного покрытия, компенсация поля первого магнита 1 полем индуцированных магнитных зарядов в области расположения магнитной стрелки уменьшается и возрастает его вклад в результирующее поле. Тем самым изменяется направление результирующего поля, что отображается ориентацией магнитной стрелки. Таким образом, поворот стрелки зависит от расстояния между первым магнитом 1 прибора и фер-

ромагнитным основанием, т.е. от толщины покрытия. Конструктивные особенности прибора, определяющие взаимное расположение магнитов 1 и 2 и магнитной стрелки, обеспечивают близкое к линейному изменение угла поворота стрелки от расстояния Z до ферромагнитного основания в диапазоне от 0 до $Z \approx 0,1L \dots 0,3L$. Угол $\theta = 150^\circ$ между направлениями намагниченности магнитов 1 и 2 обеспечивает устойчивость магнитной стрелки при любой толщине покрытия и максимально возможную чувствительность [1] ее ориентации к контролируемой толщине покрытия.

Внешний вид созданного с использованием принципов [8] прибора «Безэлектронный магнитный толщиномер БМТ-1» представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Внешний вид Безэлектронного магнитного толщиномера БМТ-1

Прибор не содержит механических движущихся и энергозакрывающих элементов (пружин, шарниров), не требует источников электропитания, может работать при любой ориентации трубы, любой температуре окружающей среды (в том числе отрицательной) и влажности (в том числе под водой). Диапазон изменения контролируемой толщины в возможных модификациях прибора – от нуля до 0,3 длины L использованных магнитов (и, например, при $L = 10$ см может существенно перекрывать верхний предел измерения известных магнитных устройств).

Выводы

В результате проведенного анализа зависимости поля двухэлементной магнитной системы от расстояния до ферромагнитного полупространства разработаны методические основы безэлектронной магнитной инди-

кации толщины немагнитного защитного покрытия на ферромагнитном основании. Разработаны принципы построения и проанализированы возможности средств безэлектронной магнитной индикации толщины защитного покрытия трубопроводов. Создан не содержащий механических движущихся и энергозадающих элементов, не требующий источников электропитания, малогабаритный прибор «Безэлектронный магнитный толщиномер БМТ-1», позволяющий проводить измерения в жестких климатических условиях и под водой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандомирский, С.Г. Использование угловых измерений при контроле параметров материалов магнитным методом. 1. Методические основы / С.Г. Сандомирский, С.А. Ревяко // Дефектоскопия. – 2003. – № 9. – С. 60 – 70.
2. Сандомирский, С.А. Использование угловых измерений при контроле параметров материалов магнитным методом. Практические приложения и приборная реализация / С.Г. Сандомирский, С.А. Ревяко // Дефектоскопия. – 2003. – № 9. – С. 71 – 80.
3. Янус, Р.И. Магнитная дефектоскопия / Р.И. Янус. – М.-Л. Гостехиздат, 1946. – 171 с.
4. Сандомирский, С.Г. Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1990. – № 12. – С. 53 – 59.
5. Бурцев, Г.А. Расчет коэффициента размагничивания цилиндрических стержней / Г.А. Бурцев // Дефектоскопия. – 1972. – № 5. – С. 20 – 30.
6. Сандомирский, С.Г. Моделирование пространственного распределения поля остаточной намагниченности продольно намагниченного стального цилиндра / С.Г. Сандомирский, М.А. Мельгуй // Дефектоскопия. – 1987. – № 6. – С. 93.
7. Зацепин, Н.Н. Неразрушающий контроль / Н.Н. Зацепин. – Минск, Наука и техника, 1979. – 192 с.
8. Устройство для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитных основаниях: пат. Респ. Беларусь № 3429 / С.Г. Сандомирский, С.А. Ревяко // Офиц. Бюллетень. – 2000. – № 2. – С. 138.

СТРУКТУРА И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ 110...330 кВ

Н.В. Грунтович, А.А. Кибалко, А.Л. Ляшкевич
ОАО «Белгорхимпром», Минск, Беларусь

Исследуются экспертные системы, которые за последнее десятилетие получили широкую популярность. Экспертная система диагностирования трансформаторов может решать ряд задач для комплексного определения его технического состояния.

Экспертные системы представляют собой одно из направлений в области искусственного интеллекта, которое приобрело широкую популярность за последнее десятилетие.

Ценность экспертных систем проявляется в нескольких аспектах:

- сбор, уточнение, кодирование и распространение экспертных знаний;
- решение проблем, сложность которых превышает человеческие возможности;
- решение проблем, требующих объема знаний, которого один человек не в состоянии охватить;
- решение проблем, для которых требуются экспертные знания из нескольких областей;
- сохранение наиболее уязвимой ценности коллектива – коллективных знаний и памяти.

Более 30 параметров должен контролировать эксплуатационный персонал, чтобы определить техническое состояние различных узлов, деталей и частей трансформаторов.

Только анализ масла должен проводиться по 13 критериям.

Экспертная система может содержать следующие модули:

- вибродиагностирование;
- диагностирование по частичным разрядам в масле и в изоляции;
- диагностирование вводов 110 кВ.
- обработка числовых значений электротехнических параметров, вводимых вручную;
- диагностирование по хроматографическому анализу растворенных в масле газов;
- диагностирование по термографии.

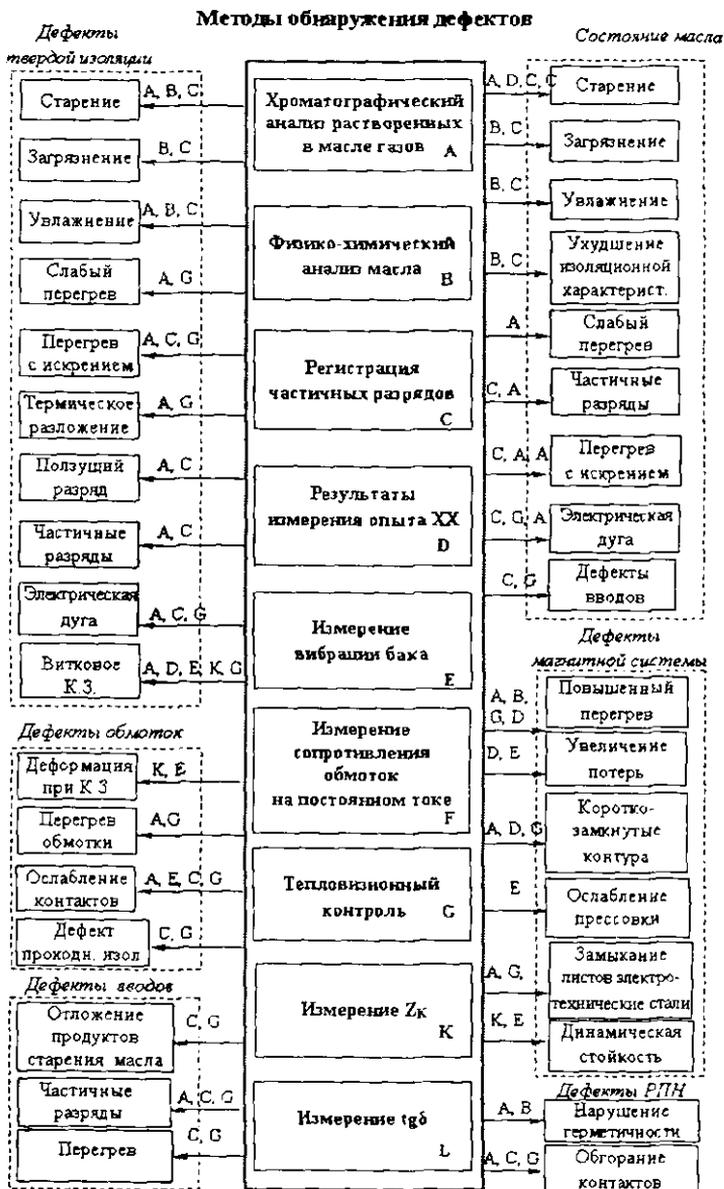


Рис. 1. Дефекты и методы обнаружения

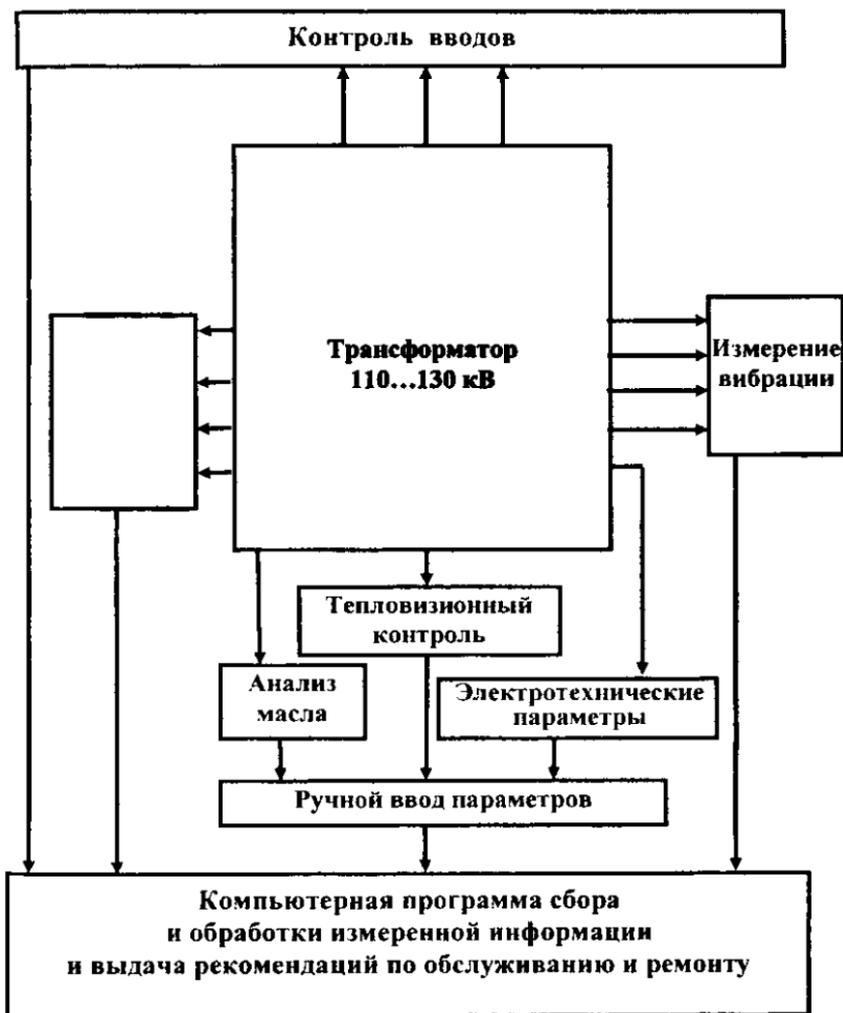


Рис. 2. Функциональная схема экспертной системы технического диагностирования трансформаторов 110...330 кВ

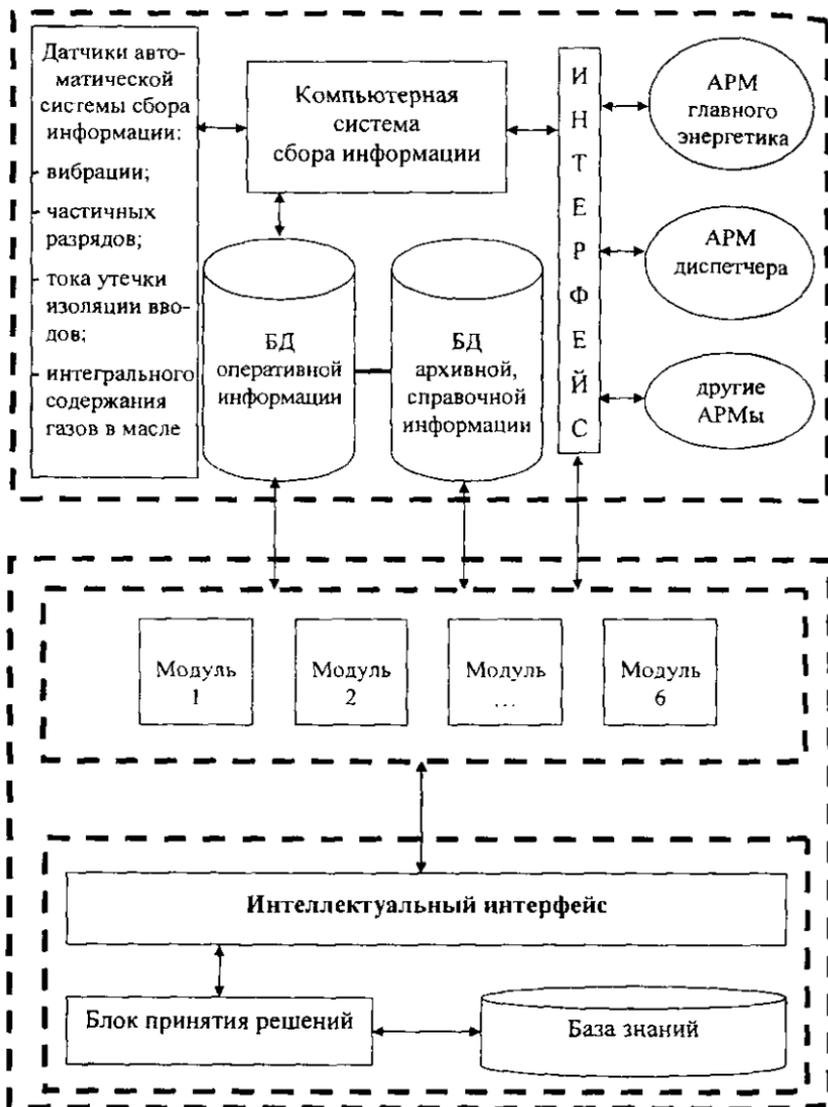


Рис. 3. Структурная схема компьютерной программы экспертной системы

Это позволит решать следующие задачи:

- Создание банка дефектов, признаков и выдача протоколов по результатам диагностирования.
- Определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформаторов по уровню вибрации.
- Определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по уровню частичных разрядов.
- Определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по результатам термографического обследования.
- Определение остаточного ресурса и аварийного состояния вводов 110 кВ по комплексу параметров.
- Определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по концентрации газов, растворенных в масле.
- Локализация дефектов в трансформаторе по результатам контроля электротехнических параметров.
- Определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по величине частичных разрядов и уровню вибрации.

В качестве иллюстрации работы экспертной системы на рисунке 4 приведен анализ вибрации бака трансформатора, а на рисунке 5 – хроматографический анализ масла бака трансформатора.

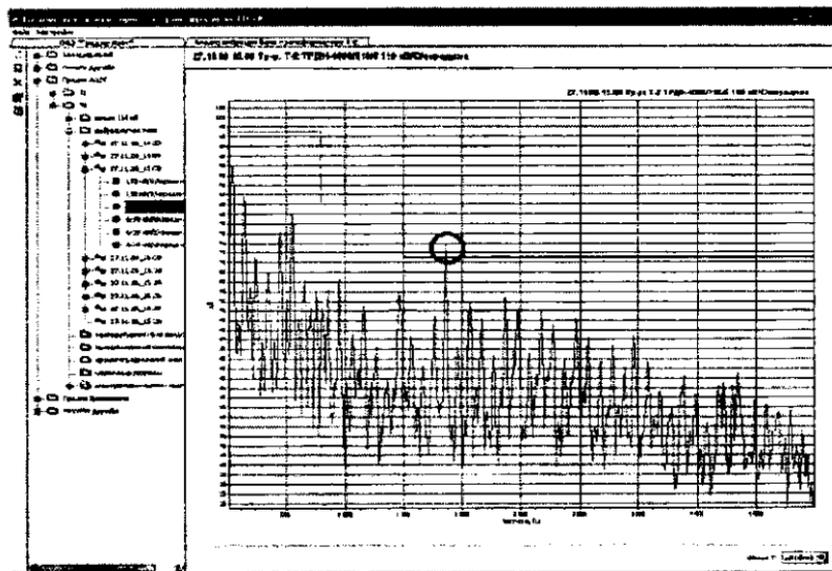


Рис. 4. Анализ вибрации бака

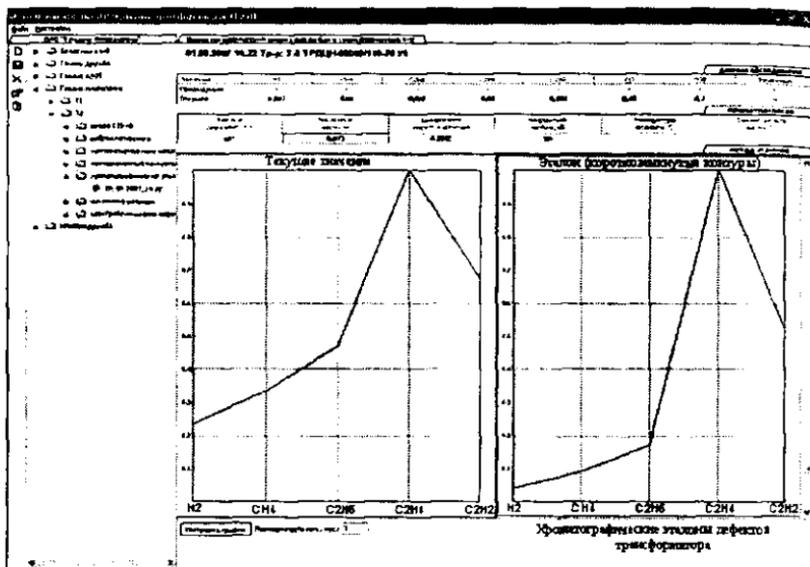


Рис. 5. Хроматографический анализ масла бака трансформатора

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев. – М.: Изд. НЦЭНАС, 2002. – 216 с.

УДК 621.438

ДИАГНОСТИКА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ТИПА ГТК-10И И ГТК-25И

Д.А. Годовский

ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной
технический университет», Уфа, Россия

В статье приведены основные методы дефектоскопии лопаток газотурбинных установок. Рассмотрены способы оценки степени деградации материалов, позволяющие прогнозировать остаточный ресурс лопаток. Предложен комплексный метод оценки степени и характера дегра-

дации материала лопаток, позволяющий определить вклад химической и механической составляющих разрушающего воздействия.

Результатом предлагаемого метода является повышение информативности и достоверности оценки характера и степени деградации материала лопатки после эксплуатации в условиях высоких температур.

В настоящее время газовые турбины широко используются в качестве энергоустановок различного назначения. Они применяются в качестве энергетических машин, двигателей самолетов, судов, автомобильных двигателей, в составе газотурбогенераторов различного назначения. Однако наибольшее распространение газотурбинные установки (отечественные и импортные) получили в качестве привода центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Газотурбинная установка (ГТУ) – достаточно сложное энергетическое оборудование, состоящее из множества деталей и узлов. Поэтому для большинства ГТУ ресурс определяется состоянием его элементов в процессе эксплуатации. В состав современной ГТУ могут входить следующие основные узлы: камера сгорания, компрессоры, турбины, регенератор, различные статорные детали, узлы управления и регулирования. В настоящее время наработка многих ГТУ, эксплуатируемых на магистральных газопроводах, превысил 100000 ч, в то время как ресурс отдельных деталей и узлов значительно меньше (например, для лопаток назначенный ресурс варьируется в диапазоне от 18000 до 80000 часов) [1].

На сегодняшний день уже накоплена достаточно большая статистика по отказам ГТУ, при анализе которой можно выделить два типа дефектов, классифицируемых по причинам возникновения [2, 3]:

1) конструктивно-производственные (случайные отклонения в геометрии профиля, в технологии изготовления узлов ГТУ и их регулировании);

2) эксплуатационные – неравномерность воздушного потока при отклонении режимов, различная наработка отдельных узлов, а следовательно и износ.

Бесперебойная работа ГТУ во многом определяется долговечностью и надежностью лопаточного аппарата. Рабочие и направляющие лопатки турбины работают в наиболее сложных эксплуатационных условиях: высоких и быстро сменяющихся температур (900 °С и выше), высоких нагрузок и вибраций, агрессивных сред (продукты горения воздушно-топливной смеси), эрозионного воздействия и т.п. Это приводит к появлению дефектов на лопатках турбины ГТУ и выходу их из строя [4]. Следовательно, для своевременного ремонта турбомашин и предотвращения аварийных ситуаций необходимо контролировать состояние лопаток в процессе эксплуатации [5, 6].

Методы дефектоскопии лопаток ГТУ. Для оценки технического состояния лопаточного аппарата в настоящий момент применяются разрушающие и неразрушающие методы контроля. Разрушающие методы контроля (фрактографические, металлографические, определение механических свойств) применяются при исследованиях с целью продления назначенного ресурса лопаток, а так же при изучении причин разрушения лопаток. Во всех других случаях применяются неразрушающие методы контроля.

Основными методами неразрушающего контроля являются:

1) визуально-оптический контроль – предусматривает визуальный и с применением специальных оптических приборов осмотр деталей с целью выявления таких повреждений как коррозия, эрозия, трещины, износ и др.;

2) метод цветной дефектоскопии состоит в нанесении на тщательно очищенную деталь проникающего жидкого реагента-красителя. По истечении некоторого небольшого промежутка времени, называемого контактным временем и необходимого для проникновения жидкости в трещины, избыточный реагент-краситель тщательно смывается, а на деталь наносится реагент-проявитель, который выводит проникающий реагент-краситель из трещин за счет капиллярного эффекта. Проявление красителя на фоне реагента-проявителя происходит в местах трещин. Данный метод является предпочтительным в условиях специализированного ремонтного предприятия, на котором контролю подлежит большое количество лопаток;

3) весовой метод – оценивается изменение массы лопатки в результате коррозионного и эрозионного износа;

4) измерение твердости – проверяется изменение твердости материала в результате эксплуатационного воздействия;

5) контроль методом вихревых токов – заключается в наведении в контролируемой детали вихревых токов, или токов Фуко, путем электромагнитной индукции. При наличии таких дефектов как трещины, неоднородность структуры изменяется электропроводность материала и, следовательно, индуцируемый ток. Изменение тока регистрируется специальными приборами;

6) метод магнитной дефектоскопии – применяется для выявления трещин, неоднородностей, посторонних включений на поверхностях деталей изготовленных из ферромагнитных материалов. Метод состоит в намагничивании детали и нанесении на ее поверхность суспензии измельченного ферромагнитного материала в соответствующей жидкости. При наличии дефекта в детали магнитное поле искажается, а магнитные частицы располагаются вдоль границ дефектного участка, тем самым, выявляя его. Данный метод позволяет надежно выявлять дефекты лопаток, однако

его применение ограничено наличием громоздкой аппаратуры для намагничивания и размагничивания деталей.

Однако для применения большинства вышеперечисленных методов требуется демонтаж лопаток и тщательная подготовка поверхности, что не всегда возможно на компрессорных станциях. Поэтому в настоящий момент является актуальной разработка методики оценки технического состояния лопаточного аппарата неразрушающими методами контроля без предварительной подготовки поверхности. Кроме того, вышеперечисленные методы обнаруживают уже образовавшиеся дефекты и не позволяют определить степень деградации материала, что актуально для оценки остаточного ресурса лопаток при эксплуатации.

В результате анализа литературы можно выделить несколько способов оценки степени деградации материалов:

1. Способ электромагнитной дефектоскопии, основанный на сканировании изделия электромагнитным преобразователем, подсчете общего числа импульсов от краев и дефектов изделия и выделении информации о его дефектности путем определения превышения общего числа импульсов над числом импульсом от краев [7];

2. Способ контроля материалов, включающий приведение в контакт электродов с материалом изделия, измерение термоЭДС и оценку по полученным значениям термоЭДС свойств исследуемого материала [8]. Недостатком этого способа является его низкая информативность.

3. Комбинированный способ дефектоскопии лопаток турбомашин, включающий совместное использование метода термоЭДС и метода индукционной дефектоскопии [9].

Недостатком данного способа является низкая информативность и достоверность оценки степени и характера деградации материала лопатки в процессе эксплуатации.

Необходимо отметить, что известные неразрушающие методы оценки степени деградации материалов, основанные на магнитных, термоэлектрических и других эффектах [10 – 13], не позволяют оценить соотношение долей химической и механической составляющих, что значительно снижает достоверность оценки характера деградации материалов. Кроме того, магнитные методы преимущественно используются для оценки состояния изделий, выполненных из ферромагнитных материалов.

Метод комплексной оценки состояния лопаток ГТУ. При исследовании степени и характера деградации материала лопаток из кобальтовых, никелевых сплавов и легированных сталей автором экспериментально установлено, что повреждения, вызванные физико-механическими факторами, в

значительной степени проявляются при магнитных методах дефектоскопии, а дефекты, вызванные диффузионно-химическими факторами (например, окисление) проявляются при дефектоскопии по параметрам термоЭДС.

Полученные результаты позволили разработать комплексный метод оценки степени и характера деградации материала лопатки, позволяющий определить вклад каждого из вида разрушающего воздействия на деградацию материала детали. Крайними случаями подобной деградации материала являются лопатки, изменение свойств которых произошло либо в результате воздействия только механических факторов (оценивается изменением магнитных параметров материала от величины M_0 до величины M_1 , где M_0 – магнитные характеристики исходного материала лопатки, M_1 – магнитные характеристики текущего состояния материала лопатки, $M_0 - M_1 \neq 0$; в то время как изменение параметров термоЭДС равны нулю, т.е. химико-диффузионные причины деградации материала исключаются), либо в результате воздействия только химических процессов (т.е. когда изменение магнитных параметров равно нулю, в то время как наблюдается изменение параметров термоЭДС от некоторого значения T_0 до T_1 , где T_0 – характеристики термоЭДС исходного материала лопатки, T_1 – характеристики термоЭДС текущего состояния материала лопатки, т.е. физико-механические факторы деградации материала исключаются). Однако в процессе эксплуатации лопаток турбомашин, как правило, деградация материала происходит в результате совместного воздействия механических и химико-диффузионных факторов. В этом случае вклад каждого из этих факторов в картину общей деградации материала определяется исходя из доли каждого из них, рассчитанной по шкале от минимального значения степени деградации того, или иного вида, до его максимально возможного значения.

Рассмотрим пример реализации способа.

Для оценки степени и характера деградации материала лопаток турбин, были изготовлены эталонные образцы рабочих лопаток из никелевого сплава IN738 применяемого в газовых турбинах ГТК-10И, ГТК-25И, с различной степенью механической и химической (окисление) деградации. Снятие магнитных характеристик производилось с помощью феррозондового комбинированного прибора Ф-205.30А, а параметров термоЭДС – прибором Т-ЗСП.

Для контрольной оценки степени и вида деградации материала эталонных и контролируемых лопаток были использованы разрушающие методы контроля с приготовлением шлифов и проведением металлографических исследований, включая оценку структурно-фазового и химического

составов материалов. Сравнительные результаты исследований приведены на рисунках 1...4.

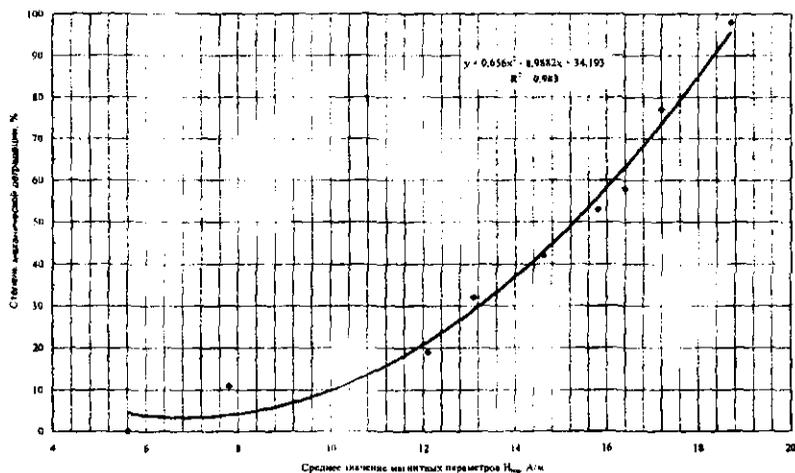


Рис. 1. Результаты замера эталонной лопатки феррозондом

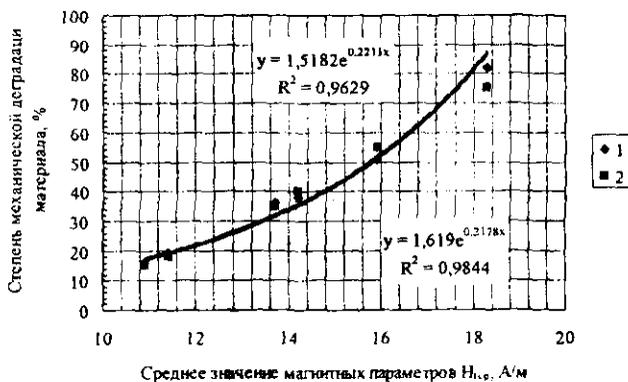


Рис. 2. Результаты замера контролируемой лопатки феррозондом:

- 1 – степень механической деградации материала, определенная по предлагаемому способу.
- 2 – степень механической деградации материала, определенная металлографическим методом

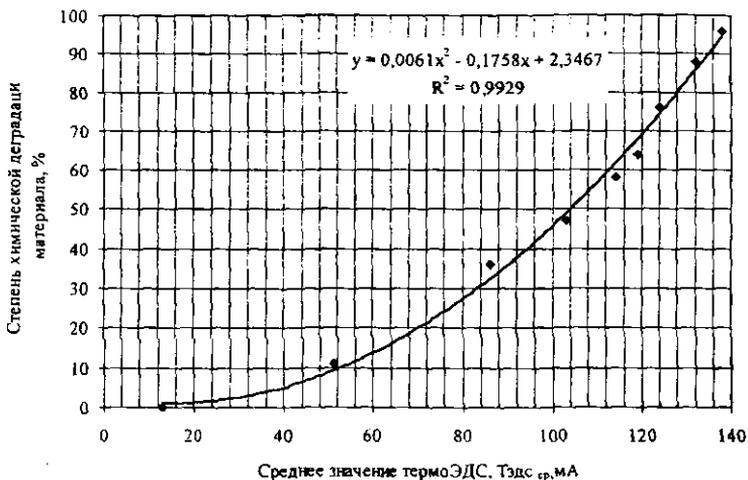


Рис. 3. Результаты замера термоЭДС эталонной лопатки

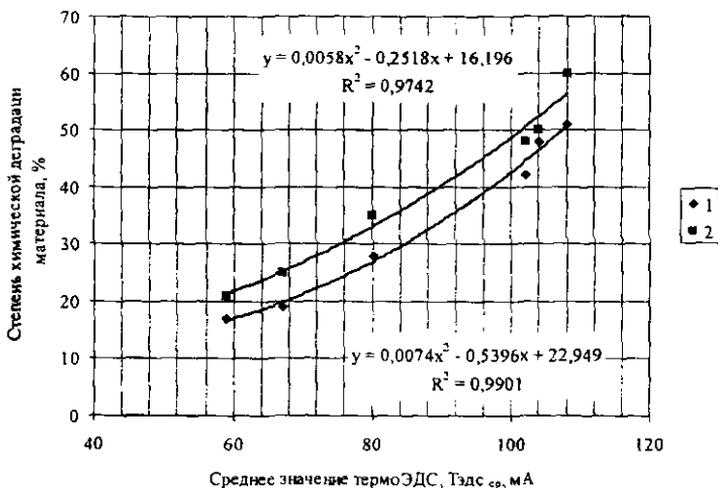


Рис. 4. Результаты замера термоЭДС контролируемой лопатки:

- 1 – степень химической деградации материала, определенная по предлагаемому способу;
 2 – степень химической деградации материала, определенная известным методом

Сравнительные результаты оценки степени и вида деградации материала эталонных и контролируемых лопаток приведены в таблице.

Общий характер деградации материала

Степень механической деградации(МД) материала, %	Степень химической деградации (ХД) материала, %,	Заключение о характере деградации материала, МД, % / ХД, %
19	42	31 % / 69 %
38	51	42,7 % / 57,3 %
82	28	74,5 % / 25,5 %
51	17	75 % / 25 %
36	48	42,9 % / 57,1 %
16	19	42,7 % / 54,3 %

Заклучение. В работе проведен обзор методов дефектоскопии лопаточного аппарата газотурбинной установки.

Основным недостатком большинства предлагаемых в настоящий момент методов является необходимость демонтажа и очистки лопаток перед проведением замеров. Кроме того, рассматриваемые методы не позволяют оценить соотношение долей химической и механической составляющих, что значительно снижает достоверность оценки характера деградации материалов. Поэтому нами предложен новый метод комплексной дефектоскопии лопаток, в котором отсутствуют вышеуказанные недостатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт длительной эксплуатации стационарных ГТУ на магистральных газопроводах / Н.В. Дашунин [и др.] // Вестн. Двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 50 – 55.
2. Рафиков, Л.Г. Эксплуатация газокompрессорного оборудования компрессорных станций / Л.Г. Рафиков, В.А. Иванов. – М.: Недра, 1992. – 237 с.
3. Годовский, Д.А. Дефекты элементов газотурбинных установок / Д.А. Годовский // Нефтегазовое дело. – 2006. – № 4. – С. 201 – 206.
4. Смыслова, М.К. Оценка работоспособности лопаток соплового аппарата газовых турбин ГТК-10И / М.К. Смыслова, Д.А. Годовский, А.В. Новиков // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. науч. тр. V междунар. науч.-техн. конф. Вып. 4. – Новополоцк, 2006. – С. 165 – 171.

5. Моверман, Г.С. Ремонт импортных газоперекачивающих агрегатов / Г.С. Моверман, И.И. Радчик. – М.: Недра, 1986. – 197 с.
6. Данилин, А.И. Диагностика и контроль деформационного состояния лопаток турбоагрегатов / А.И. Данилин, А.Ж. Чернявский., В.П. Сазанов // Контроль, диагностика. – 2003. – № 1. – С. 23 – 28.
7. А.с. СССР № 333460, МПК G 01 N 27/86, 1970.
8. Термоэлектрический способ контроля металлических материалов: пат. Рос. Федерации № 2229117, МПК G01N25/32, 2004.
9. Combined thermoelectric and eddy-current method and apparatus for non-destructive testing of metallic or semiconductor coated objects: пат. США № 5430376, МПК G01B 7/02, 1995.
10. Артамонов, В.В. Неразрушающий контроль микроструктуры металла теплоэнергетического оборудования / В.В. Артамонов, В.П. Артамонов // Дефектоскопия. – 2002. – № 2. – С. 34 – 43.
11. Дубов, А.А. Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров магнитной памяти металла / А.А. Дубов // Контроль, диагностика. – 2004. – № 1. – С. 8 – 16.
12. Диагностика состояния и оценка остаточного ресурса элементов машин и конструкций / М.Б. Бакиров [и др.] // Контроль, диагностика. – 2004. – № 1. – С. 26 – 31.
13. Филинов, М.В. Подходы к оценке остаточного ресурса технических объектов / М.В. Филинов, А.С. Фурсов, В.В. Ключев // Контроль, диагностика. – 2006. – № 8. – С. 6 – 16.