



Informational-physical peculiarities of optical-electronic introscopy of pipe articles, enabling more rational transformation of optical declinations and images, appeared declinations and heterogeneities of internal surfaces are examined.

О. Ю. БОНДАРЕВ, А. И. ПОТАПОВ, ПА «МЕГА» И СЗТУ, Москва – Санкт-Петербург,
А. П. МАРКОВ, Е. М. ПАТУК, В. В. ПОТАПКИН, ИТМ НАН Беларуси

УДК 620.179:681.7.068

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ИНТРОСКОПИИ ТРУБНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Введение. Внутренние поверхности труб как объекты неразрушающего контроля отличаются многообразием размеров и форм, номенклатурой и габаритами. Для трубных изделий характерно превышение длины над поперечными размерами полых сечений и ограниченный доступ к зонам и участкам с зарождающимися неоднородностями поверхности как потенциальными дефектами.

Интроскопия представляет собой совокупность способов и средств визуализации изображений внутренних участков изделий [1]. Она ориентирована на своевременное обнаружение скрытых поверхностных нарушений сплошности и неоднородностей информационных полей. Если магнитная дефектоскопия реализуется путем регистрации искажений формируемого магнитного поля, то электрическая дефектоскопия связана с восприятием изменений электрического поля и его параметров [3]. В отличие от других комбинированных способов дефектоскопии оптико-электронная интроскопия в большей мере соответствует специфике оперативного контроля труднодоступных участков с дистанционной трансформацией первичной информации непосредственно наблюдателю.

Способами оптико-электронной интроскопии обеспечивается кратчайший путь комплексной визуализации неоднородностей с их отображением в принятой форме для идентификации дефектов, регистрации, хранения и документирования оптических изображений неоднородных зон.

Особенности формирования интроскопических изображений. Визуализация изображений неоднородных участков внутренних поверхностей труб связана с характерными особенностями проявления и обнаружения контрастных зон. Спектрально-окрашенное изображение неоднородностей

создает дополнительные преимущества оптико-электронной интроскопии трубных изделий. В воздействии смешанного по спектру излучения с разнообразием цветов и оттенков в большей мере проявляются изменения состояний и свойств элементов поверхности. В реакции поверхностных элементов на такие воздействия отражается реальная сущность происходящих изменений их состояния и свойств. При этом всякой поверхностной неоднородности соответствует свое специфическое спектрально-энергетическое изображение, формируемое в виде источника первичной информации. Таким источником является трансформируемое наблюдателю оптическое изображение неоднородного участка или зоны интроскопируемой поверхности [2].

Специфика пространственно-распределенных информативных источников определяется структурой и конструкцией трубных изделий.

В любой трубопроводной системе объединяются различные по функциональному назначению и конструкции технологические элементы. С помощью этих элементов формируется все многообразие трубных изделий.

Простейшими и самыми распространенными технологическими элементами таких изделий являются детали. Деталь представляет собой элементарную часть изделия, которая используется как функционально определенное устройство, так и в качестве оснастки для монтажа и соединения других элементов. К функциональным устройствам относятся патрубки, отводы, переходы, тройники, седловины, заглушки, фланцы, гнутые компенсаторы и др. В монтажных устройствах объединяются крепежные детали, опоры, подвески, прокладки и др. [5].

Линия – это участок изделия, рабочие параметры которого постоянны. Линия представляет собой полный длиномер цилиндрической или другой формы как важнейшее трубообразующее звено.

Узел образуют несколько деталей с соответствующей арматурой. Узел как сборочная единица ограничен транспортными габаритами в линейных или пространственных координатах.

В монтажных работах при сборке трубных изделий применяются многообразные фасонные части и соединительные детали (рис. 1):

- фланцы, используемые для подготовки концов соединительных труб к разъемному монтажу;
- заглушки, используемые для закрытия свободных концов трубопроводов;
- тройники, предназначенные для устройства ответвлений трубопроводов при разделении потока транспортируемых продуктов или веществ;
- переходы, предназначенные для сборки трубопроводов с изменяющимся сечением (диаметром);
- отводы, используемые для разделения и изменения направления потока транспортируемого продукта.

Выбор способа и средств интроскопии трубных изделий определяется спецификой конструкции и характером расположения неоднородностей и источников информации, случайно распределенных в пространственных координатах элементов поверхности, каналах и полостях изделия. Установить разнообразные и многофакторные причинно-следственные связи конструкции и сосредоточения неоднородностей в процессе разработки, доводки и испытаний изделий весьма сложно. В то же время ряд причин появления поверхностных неоднородностей, не поддающихся прогнозированию в условиях эксплуатации трубопроводов, создает различные критические и аварийные ситуации.



Рис. 1. Комплектация трубных изделий

Статистические способы прогнозирования позволяют в некоторой мере скорректировать конструкторско-технологическую документацию и режимы работы. Однако они существенно не решают проблемы эксплуатационной надежности и экологической безопасности. Контролем на основе статистических способов ограничивается ресурс работоспособности трубных изделий. Он связан со значительными финансово-экономическими издержками на испытания, опытную эксплуатацию и диагностирование [5].

В оперативном контроле трубных изделий определяющее значение имеет способ получения первичной информации о реальном состоянии поверхности, отклонениях геометрических параметров и конфигурации. В процессе трансформации первичной информации потребителю существенную роль играют пространственно-временные корреляционные взаимосвязи эксплуатационных отказов и дефектов со случайными неоднородностями внутренних поверхностей. Единой задачей информационно-измерительного комплекса оперативного контроля является своевременное обнаружение аномальных отклонений элементов поверхности и упреждение возможных экстремальных ситуаций. Достоверная первичная информация связана с финансово-энергетическими затратами и соответствующей материально-технической контролеспособностью.

Интроскопирование поверхностей трубных изделий реализуется посредством наблюдения и контроля. Если наблюдение определяет целенаправленное восприятие изображений неоднородных зон, то в результате контроля устанавливается соответствие отклонений состояний и свойств наперед заданным требованиям.

Операции наблюдения и контроля при своем разнообразии (рис. 2) проводятся в фиксирован-



Рис. 2. Структура оптико-электронной интроскопии

ном расположении, когда приемник изображения ориентирован на определенный участок поверхности, и дистанционно, когда приемник или изделие изменяют свое расположение, например при сканировании. Операции осмотра и обзора имеют место при дефектоскопии внутренних поверхностей изделий с ограниченным доступом, например, отводы, тройники, заглушки и другие элементы. В отличие от эндоскопии, когда интроскопируется поверхность изделия ограниченной длины преимущественно вручную, при видеоскопии для сканирования длинномерных изделий используются электромеханические средства (двигатели, приводы и т. д.).

В визуально-оптической интроскопии фиксированный и дистанционный контроль осуществляются с визуальным восприятием наблюдателем, трансформацией оптических изображений и выявлением экстремальных отклонений геометрических параметров в поле нормированных допусков.

Техника и технология интроскопии. В оптико-электронной интроскопии элементов и самих трубных изделий эффективно применяется весь комплекс методов и средств неразрушающего контроля. Однако низкий энергетический уровень источников первичной информации и их случайное пространственно-временное рассредоточение в пространственных координатах изделия создают дополнительные сложности по ориентированному воздействию излучателей и локализованному приему отраженной неоднородностью энергии. Селективная ориентация излучателей и приемников относительно первичных признаков проявляющейся неоднородности позволяет в большей мере адаптироваться к специфике конструкции изделий и элементов поверхности. С учетом их конструктивно-технологических особенностей неоднородные зоны и участки обусловлены концентрацией напряжений и сопряжений геометрических элементов, в которых интенсивнее протекают деградиационные процессы.

Несовершенство конструкции трубных изделий, их метрологического и приборного обеспечения ограничивают возможности оперативного применения техники и технологий неразрушающего контроля для визуализации изображений поверх-

ностных неоднородностей. Визуализация таких изображений связана с проблемами ориентированной передачи воздействующего лучистого потока и трансформации информативных излучений, сформированных при спектрально-энергетическом взаимодействии излучений с неоднородностями. Неоднородности, как потенциальные дефекты, статистически не определены и носят случайный характер как по геометрическим и спектральным параметрам, так и по видам и расположению. Многообразие элементов, деталей и трубных изделий исключает возможность применения и создания унифицированных технологий и средств интроскопии [4].

Основу оптико-электронной интроскопии составляют эффекты рассеяния воздействующего лучистого потока при взаимодействии с неоднородными участками элементов поверхности. Если при отражении и поглощении изменяется интенсивность, то в рассеянном информативном излучении изменяются его спектрально-энергетические характеристики. Слабая проявляемость информативных излучений и низкий уровень их источников создают определенные трудности в восприятии и трансформации формирующихся оптических изображений неоднородных зон [3].

Структура трансформации изменяющихся состояний и свойств поверхностей (рис. 3) в их абстрактное отображение наблюдателю определяется разноуровневой системой оптико-электронной интроскопии: изменения в пространстве состояний и свойств; физические признаки неоднородностей; трансформация спектрально-энергетического изображения этих признаков.

В системной интроскопии обеспечивается схемная и функциональная совместимость всех операций информационно-физической визуализации неоднородностей в единой структуре трансформации их информативных изображений.

Пространство состояний и свойств внутренних поверхностей трубных изделий определяется изменениями геометрических параметров. Среди них самыми информативными являются профили и контуры элементарных участков. Они различаются по форме, преимущественно в виде тел вращения, технологическими и метражными особенностями (рис. 4).

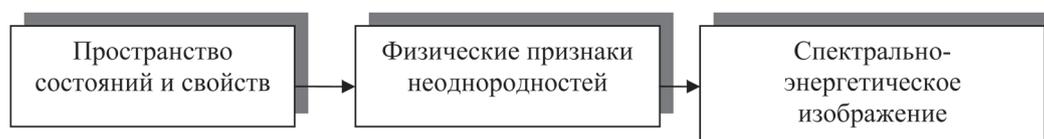


Рис. 3. Структура информационных преобразований в оптико-электронной интроскопии

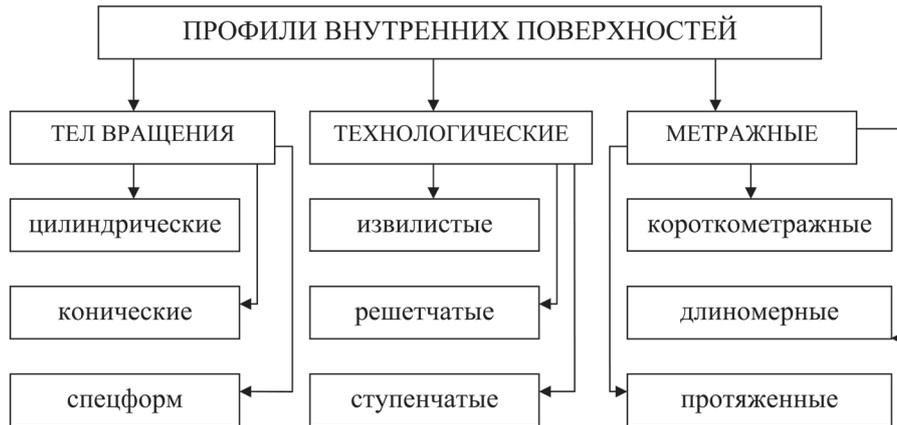


Рис. 4. Разновидности интроскопируемых поверхностей трубных изделий

Наряду с широко распространенными цилиндрическими и коническими внутренними поверхностями и их конструктивными сочетаниями производятся трубные изделия специальных форм, например, лопасти вертолетов и другие изделия.

С учетом технологических особенностей изготавливаются изделия извилистой, решетчатой и ступенчатой форм, используемых на транспорте и в различных газодинамических системах.

Метражными параметрами условно подразделяются изделия на короткометражные, длиномерные и протяженные. Если для короткометражных изделий соотношение длины и сечения составляет единицы, а для длиномерных – десятки, то для протяженных изделий такое соотношение превышает тысячи.

Технологии интроскопии соответственно адаптируются к специфике трубного изделия. Если, например, для короткометражных изделий интроско-

пия может проводиться с одной установки со входа на выход, то для длиномерных интроскопия проводится пораздельно: сначала осматривается одна часть изделия, потом интроскоп вводится с другого конца.

С учетом массогабаритных параметров преимущественно используются переносные интроскопы, самодвижущиеся средства или с ручным сканированием.

Для интроскопии протяженных изделий создаются специальные средства и технологии, ориентированные на индивидуальные технологические и конструктивные особенности.

Такие системы строятся на основе структур пространственно-временной интроскопии (рис. 5).

Посредством прямой 1 и обратной 2 связи реализуется пространственно-временное взаимодействие оптико-механической системы с внутренней поверхностью изделия. Под действием излучателя,



Рис. 5. Структура пооперационных взаимодействий в системе пространственно-временной интроскопии с локальными связями: ⇨ – оптические; ⇨ – механические; → – электрические: 1 – связь прямая; 2 – связь обратная; 3 – поверхность изделия

оптически связанного с источником излучения и электрически с блоком питания, через привод сканера формируется информативное изображение неоднородности. За счет пространственного фотометрирования с механизмом продвижения приемника изображений выявляется зарождающаяся неоднородность, в зоне которой формируется оптический контраст. При этом спектрально-энергетическая адаптация обеспечивает оптимальную спектрально-энергетическую трансформацию контрастных изображений с пространственно-энергетической обработкой и отображением результатов в виде, воспринимаемом наблюдателем или ЭВМ.

Особенности моделирования информационно-преобразовательных операций в процессе трансформации световой энергии и изображений. В оптико-электронной интроскопии полых поверхностей определяющее значение имеют операции формирования и каналирования первичной информации, интегрально отражающей изменения состояний и свойств поверхностей. Всякие отклонения материальной поверхности связаны с флуктуациями взаимного расположения отдельных точек, характеризующих количественные и качественные показатели отклонений. В моделях изображений неоднородностей в виде совокупности разносветящихся точек с элементарными участками рассеивающих неоднородностей спектрально-энергетическое отображение однозначно и достоверно описывает происходящие изменения свойств. Однако для реальных неоднородных участков топология распределения таких разносветящихся точек носит случайный характер с их пространственно-временными, физико-техническими, информационно-физическими и другими неопределенностями. В любом случае структуру информационно-преобразовательного процесса определяют излучатель, неоднородность поверхности и оптико-электронный приемник. Каждый из этих составляющих, образующих единый канал, по-разному проявляет свои специфические возможности [3, 5].

Под воздействием светового потока Φ_0 излучателя в процессе его взаимодействия с неоднородностью формируется информативное изображение $\Phi_{\text{и}} = F\Phi_0$. Оператор F определяет характер такого взаимодействия излучателя с неоднородностью с учетом ее свойств, геометрических параметров и характеристик материальной поверхности. На информативности изображения $\Phi_{\text{и}}$ сказываются не только пространственно-временные и спектрально-энергетические параметры излучателя и неоднородного участка поверхности, но и их простран-

ственное расположение, форма, размеры и др. В качестве информативных изображений выбираются те составляющие лучистого потока, которые наиболее полно отражают специфику изменений состояний и свойств поверхности.

Во взаимно согласованной ориентации излучателя, неоднородного участка поверхности и приемника, как чувствительного элемента отраженного спектрально-энергетического излучения, важное значение имеют длина волны излучения, апертурные углы, отражательная способность поверхности и другие факторы.

В качестве информативного параметра, наиболее полно отражающего физическую сущность происходящих изменений (отклонений), применяется информационная функция преобразования:

$$I_p = F(r, m, \alpha, \beta, \gamma_n, \gamma_u),$$

где I_p – интенсивность лучистого потока, рассеянного элементом неоднородности радиусом r , комплексным показателем преломления m под углами α и β в направлении приемника с угловой апертурой γ_n и апертурой излучателя γ_u .

Информативное изображение при этом формируется по законам отражения и пропускания. Для металлических изделий максимальное значение яркости контрастной зоны характеризуется ориентированным направленным-рассеянным или направленным-диффузным излучением. Для равномерного диффузного отражения яркость оптического изображения контрастной зоны определяется законом распределения светящихся точек неоднородности и не зависит от направления приема. На формирование оптического изображения поверхностной неоднородности или отклонений геометрических параметров существенное влияние оказывают материалы изделия, спектральные коэффициенты ρ диффузного и зеркального отражений (рис. 6).

В общем случае физико-техническая проявляемость и выявляемость изменений состояний и свойств материальной поверхности на первичном уровне абстрагируются в информационно-физическую обнаруживаемость и восприимчивость формирующейся при этом спектрально-энергетической совокупности информативных параметров другой физической природы уже на следующем уровне. При дистанцировании первичной информации на другой уровень исходят из предположения, что не вся совокупность информативна в равной мере и несет максимум полезной информации. В этом случае не имеет смысла загружать последующий уровень заведомо ненужной информацией.

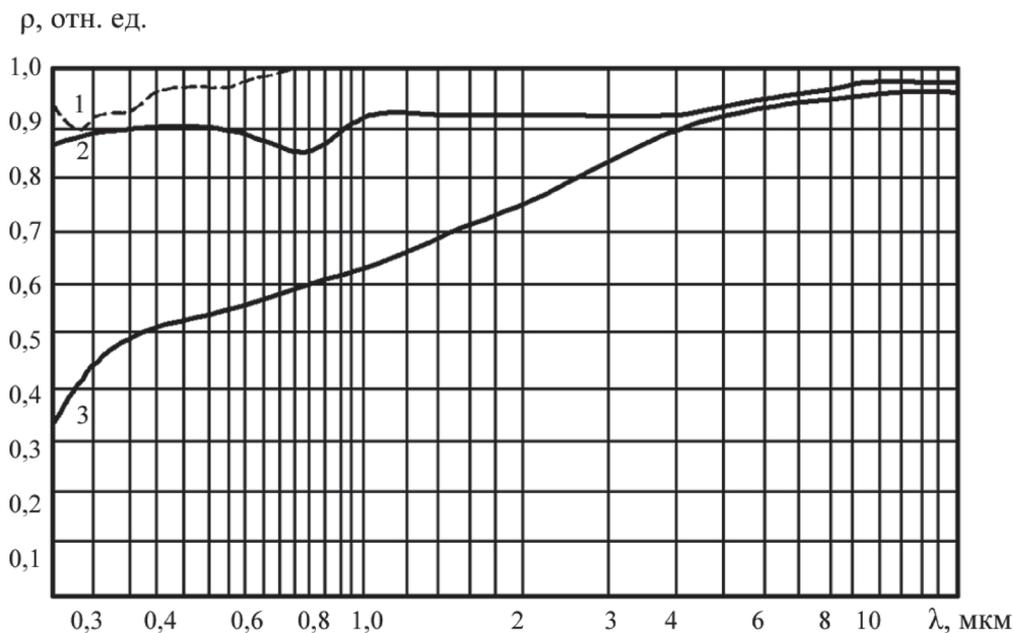


Рис. 6. Спектральные коэффициенты диффузного и зеркального отражений для материалов: 1 – мелкокристаллический (напыленная) оксид магния; 2 – алюминий; 3 – сталь

Аналогичная ситуация складывается и при идентификации поверхностной неоднородности, классификации или распознавании дефектов. При этом путем фильтрации освобождают более высокий уровень переработки от ненужной информации. Фильтрация и функциональное преобразование весьма эффективны и в реализации этих операций в комбинированной интроскопии трубных изделий.

Слабая проявляемость неоднородных зон поверхности, низкий уровень информативных источников с размытым контрастом и случайное про-

странственно-временное их распределение в трубных изделиях требуют максимального учета всех информационных особенностей оптико-электронной интроскопии.

Пространственно-ориентированное взаимодействие излучателей и неоднородной поверхности позволяют создавать адаптивные способы и средства интроскопии. Оптимальная ориентация и селективная локализация генерируемых оптических излучений и изображений существенно повышают достоверность интроскопии и при снижении материально-энергетических издержек.

Литература

1. Марков П. И. Волоконно-оптическая интроскопия / П. И. Марков, А. А. Кеткович, Д. К. Сагтаров. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1983.
2. Марукович Е. И. Дистанционная дефектоскопия поверхностей протяженных изделий / Е. И. Марукович, Е. М. Патук, О. Ю. Бондарев и др. // Литье и металлургия. 2010. № 3 (57). Спец. вып. С. 222–229.
3. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособ. для приборостроительных вузов / М. М. Мирошников. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1983.
4. Плетнев С. В. Волоконно-оптические методы и средства дефектоскопии: справ. пособ. / С. В. Плетнев, А. И. Потапов, А. П. Марков. СПб.: ЛИТА, 2001.
5. Сагтаров Д. К. Волоконная оптика / Д. К. Сагтаров. Л.: Машиностроение, 1973.
6. Соснин Ф. Р. Неразрушающий контроль: справ.: в 7-ми т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2-х кн.: Кн. 1: Визуальный и измерительный контроль. К. 2: Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2003.