

В.В. Пронин, А.Е. Базулин, Д.С. Тихонов, П.Н. Шкатов

ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АНТЕННЫ

Аннотация

Рассмотрены современные проблемы, связанные с эрозионно-коррозионным износом металла трубопроводов с неэквидистантными поверхностями.

Описана разработанная технология построения профиля донной поверхности с применением метода цифровой фокусировки антенны. Расчеты основных параметров схем контроля технологии проводились методом лучевых трубок с применением верифицированного программного средства CIVA.

Приведены примеры использования и результатов построения профиля на модельных данных. Описаны перспективы развития технологии.

Ключевые слова: эрозионно-коррозионный, ЦФА, толщинометрия СС, построение профиля дна, толщинометрия неэквидистантных поверхностей.

Трубопроводы в процессе эксплуатации подвержены эрозионно-коррозионному износу. Под воздействием теплоносителя происходит эрозионное разрушение защитной оксидной пленки на внутренней поверхности, что способствует протеканию процесса коррозии, возникновению коррозионных трещин, в результате чего происходит разрушение металла стенки трубопровода.

Стоимость защиты от коррозии, дефектоскопии и устранения разрушительного воздействия коррозии обходится промышленности во всем мире в миллиарды долларов.

На сегодняшний день используется широкий спектр различных методов и технологий неразрушающего контроля для определения толщины выявления коррозионных поражений изделия [1]-

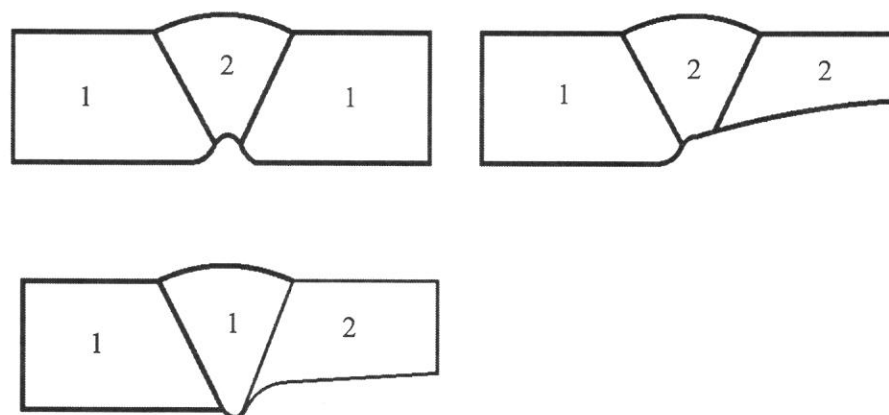


Рис. 1. Примеры эрозионно-коррозионного износа в области композитных сварных соединений и околошовной зоны: 1 – с высоким содержанием хрома; 2 – с низким содержанием хрома

[3]. Весьма эффективны ультразвуковые методы толщинометрии [4]-[11], основанные на свойстве отражения ультразвуковых волн на границах раздела сред. Их основные достоинства состоят в возможности контроля при одностороннем доступе, высокой производительности и относительно простых требованиях к подготовке участка измерения.

Однако известные методы ультразвукового контроля не обеспечивают достоверного выявления коррозионных поражений в зонах с неэквидистантными внешней и внутренней поверхностями трубопровода, например, при контроле разнотолщинных объектов контроля (ОК) или контроле в области сварных соединений. Примеры эрозии-коррозии в области сварных соединений представлены на *рис. 1*. Для контроля толщины сварных соединений используют дифракционно-временной метод TOFD [4], [12], но у этого метода очень малое пространственное разрешение и большая погрешность, что приводит к недооценке или переоценке дефектности сварного соединения.

Для контроля толщины трубопроводов с неэквидистантными поверхностями разработана [13] технология построения профиля донной поверхности на основе ультразвукового метода с применением цифровой фокусировки антенны (ЦФА). Метод основан на излучении в ОК ультразвуковых волн и регистрации этих ультразвуковых волн, отраженных от внутренних границ ОК, а также последующей цифровой обработке ЦФА [14] с формированием изображений из зарегистрированных сигналов.

Описание технологии

Технология основана на применении двух антенных решеток (АР) с двумя одинаковыми призмами по двум схемам – раздельной и совмещенной (*рис. 2*).

Реализацию разработанной технологии построения профиля донной поверхности можно разделить на три основных этапа.

Этап 1. Регистрация эхо-импульсов

На первом этапе проводится сбор данных путем излучения и регистрации эхо-сигналов. Этот процесс называют методом двойного сканирования [14]. Сканирование может выполняться как по раздельной, так и по совмещенной схеме. При применении раздельной схемы одна из АР излучает эхо-импульсы в ОК каждым элементом независимо и последовательно. Вторая АР работает целиком в режиме приемника. В отличие от раздельной схемы, при применении совмещенной каждая АР является и излучателем, и приемником, работающими аналогично.

Этап 2. Цифровая обработка сигналов

На втором этапе производится обработка принятых эхо-сигналов методом ЦФА. На *рис. 3* для раздельной схемы изображена траектория, по которой распространяется импульс от элемента с координатами $r_t = (x_t, z_t)$ излучающей АР до элемента с координатами $r_r = (x_r, z_r)$ принимающей АР. Измеренный принимающей АР эхо-сигнал обозначим $p(r_t, r_r, t)$, где t – время задержки от излучателя до приемника.

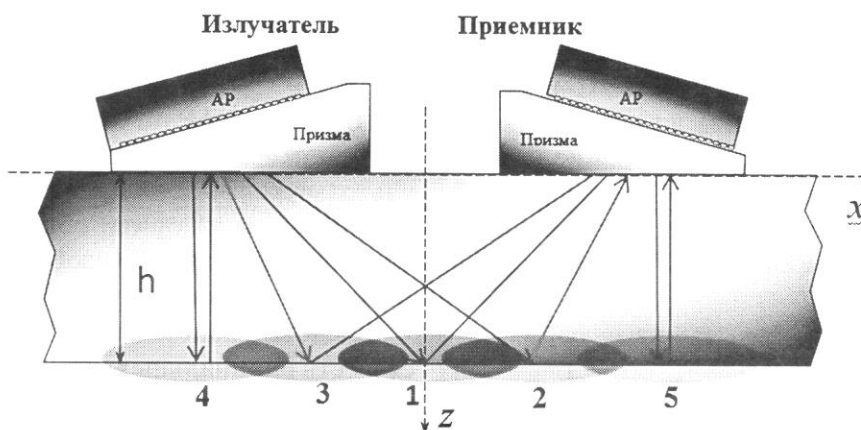


Рис. 2. Технология построения профиля донной поверхности с применением ЦФА

После задания области восстановления изображения (ОВИ) (рис. 3) в ОВИ выбирается «точка прицеливания» с координатами (x, z) .

Далее для выбранной «точки прицеливания» по формуле (1) рассчитывается время задержки каждого элемента излучающей АР с учетом прохождения эхо-импульса в призме и преломления на границе с ОК

$$t_i = \sum_{n=1}^{m+3} \frac{|r|}{c_n}, \quad (1)$$

где i – номер элемента АР; c_n – скорость звука; m – число отражений от границ образца. В данном случае – одно отражение от дна и $m = 1$, поэтому для определения c_n вдоль траектории распространения эхо-импульса список скоростей имеет вид: $\{c_w; c_i; c_r; c_w\}$, где c_w – скорость звука в призме; c_i и c_r – скорости звука в ОК. Для упрощения список скоростей целесообразно представить в виде $\{c_i; c_r\}$. С учетом трансформации при отражении от границы ОК типа ультразвуковой волны возможны четыре варианта записи:

- 1) $\{c_s; c_s\}$ – для поперечной волны;
- 2) $\{c_i; c_i\}$ – для продольной волны;
- 3) $\{c_i; c_s\}$ – для продольной волны, трансформировавшейся в поперечную при отражении от дна;
- 4) $\{c_s; c_i\}$ – для поперечной волны, трансформировавшейся в продольную при отражении от дна,

где c_l – скорость звука продольной волны в ОК; c_s – скорость звука поперечной волны в ОК.

Назовем вышеперечисленные варианты акустическими схемами.

Для расчета времени задержки акустической схемы для поперечной волны $\{c_s; c_s\}$ в предположении лучевого приближения необходимо вычислить длины путей распространения эхо-импульсов от излучающего элемента до «точки прицеливания» и от «точки прицеливания» до приемника. При прохождении ультразвуковой волной границы «призма – поверхность ОК» происходит преломление в точке с координатами (x_{lw}, z_{lw}) по закону Снеллиуса:

$$\frac{\sin \alpha_w}{c_w} = \frac{\sin \alpha}{c_s}, \quad (2)$$

где α_w – угол падения ультразвуковой волны; α – угол преломления ультразвуковой волны. Выражая тригонометрические функции через координаты, получим

$$\sin \alpha_w = \frac{|x_i - x_{lw}|}{\sqrt{(x_i - x_{lw})^2 + (z_i - z_{lw})^2}};$$

$$\sin \alpha = \frac{|x - x_{lw}|}{\sqrt{(x - x_{lw})^2 + (z - z_{lw})^2}}. \quad (3)$$

Подставляя уравнения (3) в уравнение (2), после возведения обеих частей уравнения в квадрат и дополнительных преобразований приходим к уравнению четвертой степени, решаемому, например, методом Феррари.

Для решаемой задачи достаточно в интервале $x_i < x_{lw} < x$ определить только действительный корень уравнения.

Аналогично вычисляется координата x_{wr} для точки преломления ультразвуковой волны при прохождении границы «поверхность ОК – призма принимающей АР».

Пусть $s(t)$ – вид излученного эталонного сигнала. Тогда его оценку можно представить в виде

$$\hat{p}(r_i; r_i; t) = s(t - t_{del}), \quad (4)$$

где

$$t_{del} = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{m+3} \frac{|r|}{c_n}.$$

По результатам расчетов определяется значение амплитуды эхо-сигнала в каждой точке из ОВИ для каждого i -го элемента излучающей АР. При сложении i решений вычисляется восстановленное парциальное изображение, полученное для поперечной волны $\{c_s; c_s\}$ по отдельной схеме.

Повторив алгоритм для оставшихся акустических схем, получим четыре парциальных изображения при применении отдельной схемы.

При работе АР по совмещенной схеме (рис. 2) излучаются и принимаются только продольные ультразвуковые волны, поэтому, применив описанный выше алгоритм обработки, получим по одному парциальному изображению донной поверхности для каждой из АР.

Следовательно, на втором этапе определяют шесть парциальных изображений, восстановленных по следующим акустическим схемам (рис. 2):

- 1) для поперечной волны по отдельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 1);

- 2) для продольной волны по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 1);
- 3) для продольной волны, трансформировавшейся в поперечную при отражении от дна, по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 2);
- 4) для поперечной волны, трансформировавшейся в продольную при отражении от дна, по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 3);
- 5) для продольной волны по совмещенной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 4);
- 6) для продольной волны по совмещенной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 5).

Этап 3. Алгоритм построения профиля дна

На третьем этапе применяется алгоритм построения профиля донной поверхности. Здесь в качестве входных данных используются полученные на предыдущем этапе парциальные изображения. Затем происходит их нормировка (выравнивание амплитуд относительно одного из изображений) и объединение в суммарное восстановленное изображение (рис. 4). Объединение выполняется по максимуму, т. е. в каждой точке

ОВИ принимается значение амплитуды, являющейся максимальной среди амплитуд точек с теми же координатами каждого из парциальных изображений.

Далее проводится определение «опорных» значений толщины (т. е. толщинометрия слева и справа под АР). Для этого используются парциальные изображения, полученные при применении совмещенной схемы. В каждом из изображений для каждой координаты x выбирается точка с максимальным значением амплитуды с заданной отсечкой. Координата z этой точки является значением толщины в точке с координатой x . Если для координаты x такой точки с амплитудой больше отсечки нет, то значение толщины для нее принимается равным нулю. Далее вычисляется среднее всех ненулевых значений толщины, которое является «опорным» для отрицательных и для положительных x (система координат по рис. 3).

Поиск профиля дна проводится по суммарному восстановленному изображению с заданным окном от «опорной» толщины для отрицательных и положительных x и с заданной отсечкой от максимальной амплитуды. Если в пределах окна нет такой точки с амплитудой больше отсечки, то поиск происходит по всему столбцу. Если и в этом случае такой точки нет, то для x толщина «не определена». Заращивание таких «не определенных» значений толщин производит-

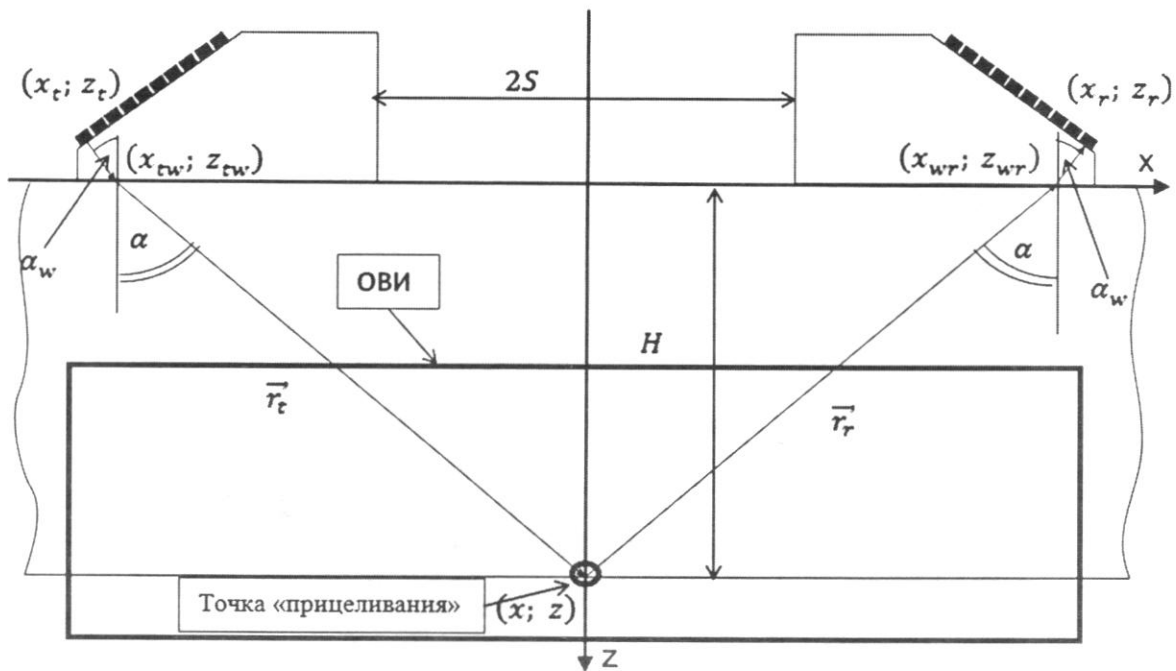


Рис. 3. Траектория ультразвуковой волны при раздельной схеме

ся методом интерполяции. Построенный профиль дна изображен на *рис. 4* и наложен на суммарное восстановленное изображение.

Примеры практической реализации технологии

Были исследованы возможности применения разработанной технологии. Исходные данные для обработки получены путем моделирования в программной среде CIV4 [15].

Пример 1. Определение профиля сварного соединения с вогнутым внутренним валиком

Толщина стенки основного металла 40 мм, материал – перлитная сталь. На внешней поверхности присутствует валик усиления. Применяются АР со следующими характеристиками: частота 5 МГц, 32 элемента, расстояние между центрами элементов 1,0 мм (шаг). Призмы из рексолита с углом наклона 35°. Данная конфигурация АР и призм используется для всех описываемых примеров.

На *рис. 5* показано суммарное восстановленное изображение, применяя алгоритм к которому получили профиль дна, изображенный на *рис. 6*. Расстояние между передними гранями призм – 70 мм.

Ширина области восстановления (ОВ) донной поверхности при данной конфигурации равна 160 мм.

Пример 2. Определение коррозионного износа при разнотолщинности стенки основного металла

Толщина линейно меняется от 10 до 69,5 мм на отрезке длиной 220 мм. На *рис. 7* представлено суммарное изображение, на *рис. 8* – профиль дна.

Пример 3. Применение технологии построения профиля донной поверхности со сканированием. Построение карты коррозии

При сканировании алгоритм послойно складывает профили донных поверхностей, формируя таким образом карту коррозии (*рис. 9*). Такое применение позволяет «образмеривать» коррозионный износ. В данном случае выявлен и образмерен плоскодонный отражатель диаметром 10 мм на глубине, равной 33 мм.

Пример 4. Выявление разнотолщинности кромок

Толщина образца – 14 мм, толщина правой кромки – 12,2 мм, толщина левой кромки –

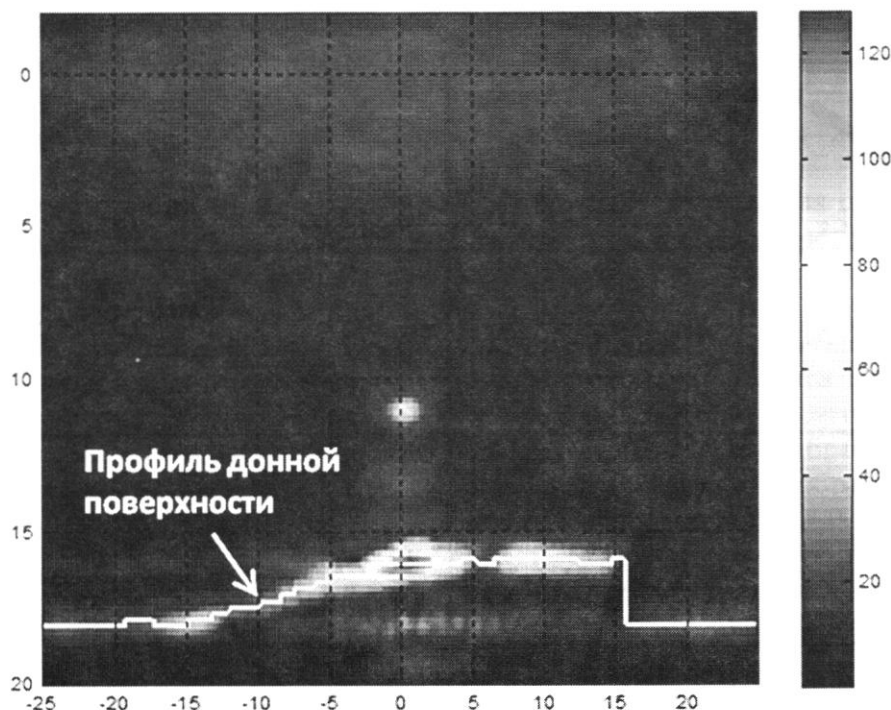


Рис. 4. Суммарное восстановленное изображение с профилем донной поверхности

11,8 мм. Модель и профиль восстановленной донной поверхности изображены на рис. 10.

Среднее квадратическое отклонение погрешности измерения толщины по восстановленному профилю донной поверхности на модельных данных в примерах 1-4 составляет не более 0,2 мм.

Исследование влияния базы на ширину области восстановления

Было проведено исследование влияния базы на ширину области восстановления (ОВ) донной поверхности. Базой называют расстояние между передними гранями призм. Для расчетов были выбраны АР с частотой 5 МГц, 32-элементные, с

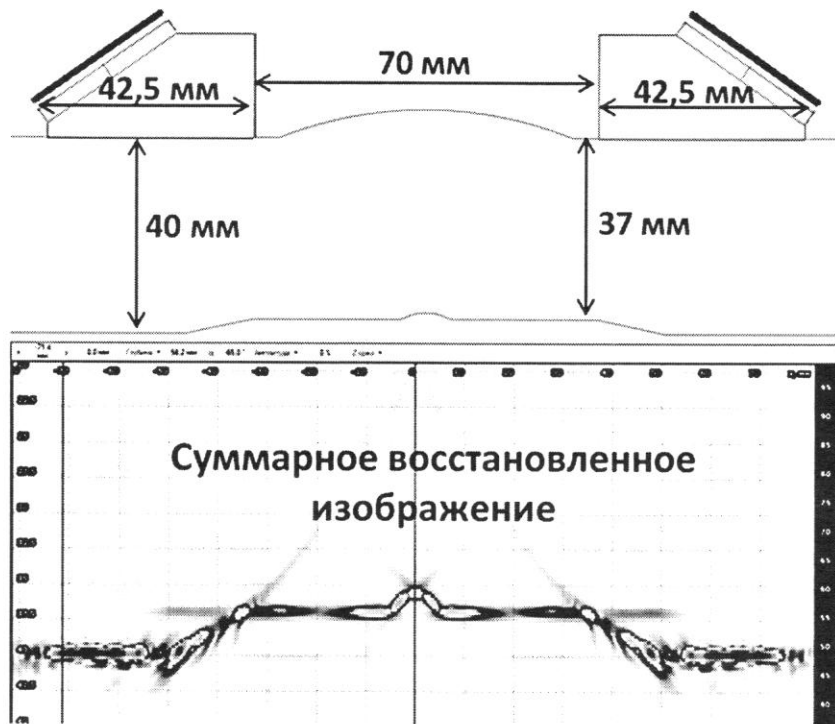


Рис. 5. Суммарное восстановленное изображение сварного соединения с вогнутым внутренним валиком

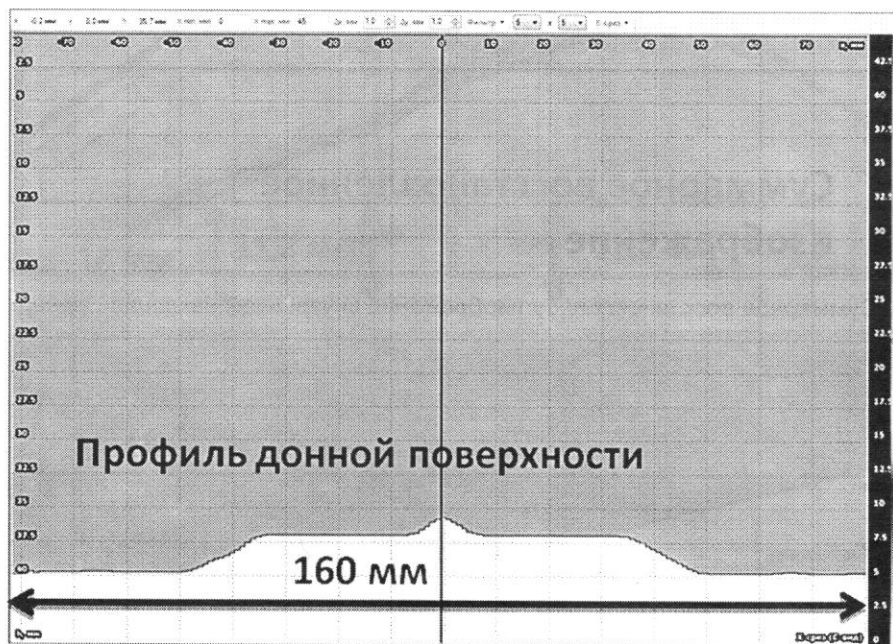


Рис. 6. Профиль донной поверхности сварного соединения с вогнутым внутренним валиком

шагом 1,0 мм, и призмы из рексолита с углом ввода 35°.

Логично предположить, что чем больше база, тем шире ОВ донной поверхности. Однако при увеличении ОВ будут появляться разрывы при сложении парциальных изображений (рис. 11), полученных по разным акустическим схемам. Это приведет к ухудшению качества оценки профиля из-за повышения вероятности пропуска коррозионного износа. Таким образом, необходимо подобрать такое расстояние между передними гранями призм, при котором ширина ОВ максимальна, а разрывы еще не возникают.

Кроме того, чем больше толщина ОК, тем дальше необходимо раздвинуть друг от друга призмы с АР для получения большей ширины ОВ, но при достижении определенного значения толщины (оптимальной для данной конфигурации) появятся разрывы, и при дальнейшем увеличении разрывы будут увеличиваться. Это происходит вследствие того, что при увеличении толщины ОК точки пересечения акустических полей будут находиться все дальше и в итоге окажутся на таком расстоянии друг от друга, которое приведет к возникновению разрывов. При появлении данного эффекта необходимо сдвигать призмы бли-

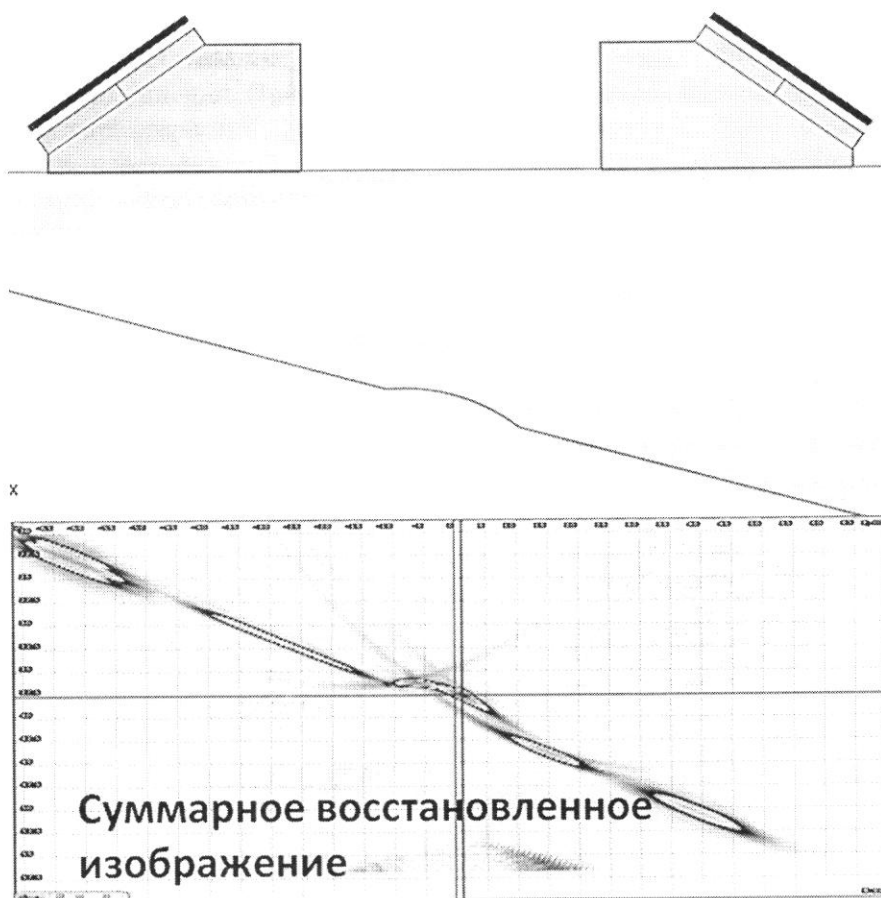


Рис. 7. Суммарное восстановленное изображение внутренней наклонной поверхности

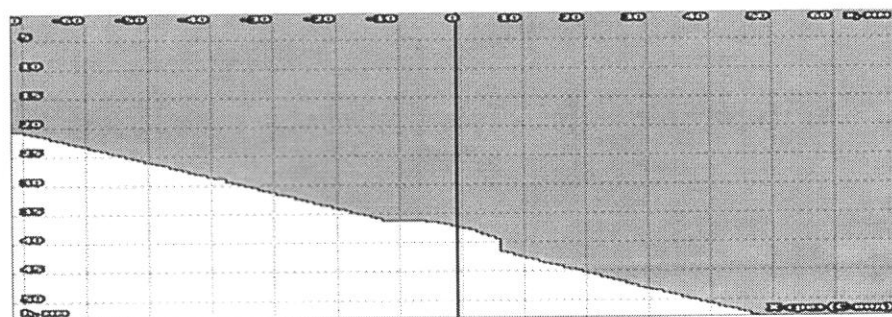


Рис. 8. Профиль донной поверхности с внутренней наклонной поверхностью

же друг к другу до момента исчезновения разрывов, но при этом ОВ будет сокращаться.

Расчет оптимального значения базы проводился по разработанной для этой цели программе.

Алгоритм работы программы:

1. Входные данные: параметры АР, призм, ОК, а также значение базы.
2. Расчет положений элементов каждой АР.
3. Расчет зоны прозвучивания в ОК для каждой акустической схемы (всего 6 схем и соответственно зон) с учетом преломления, отражения и трансформации моды на границах сред.

4. Анализ пересечений соседних зон прозвучивания. Значение базы считается оптимальным, когда размер всех пересечений (или минимального) соседних зон прозвучивания находится в диапазоне 2...4 мм. При большем размере пересечений значение базы увеличивают, при отсутствии пересечений – соответственно уменьшают.

Результаты расчета базы в зависимости от толщины ОК для исследуемой конфигурации представлены на рис. 12. График представляет собой оптимальный выбор базы для контроля ОК в зависимости от его толщины. При увеличении базы

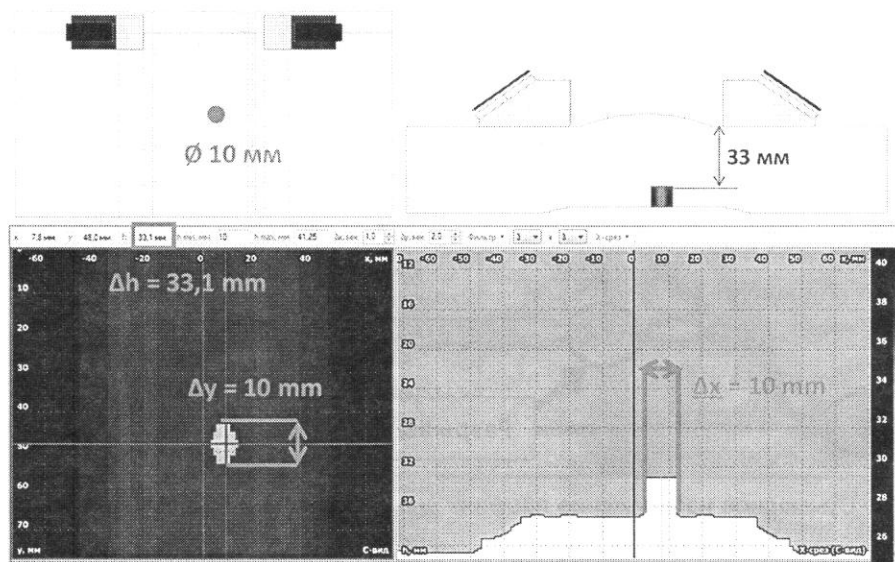


Рис. 9. Построение карты коррозии

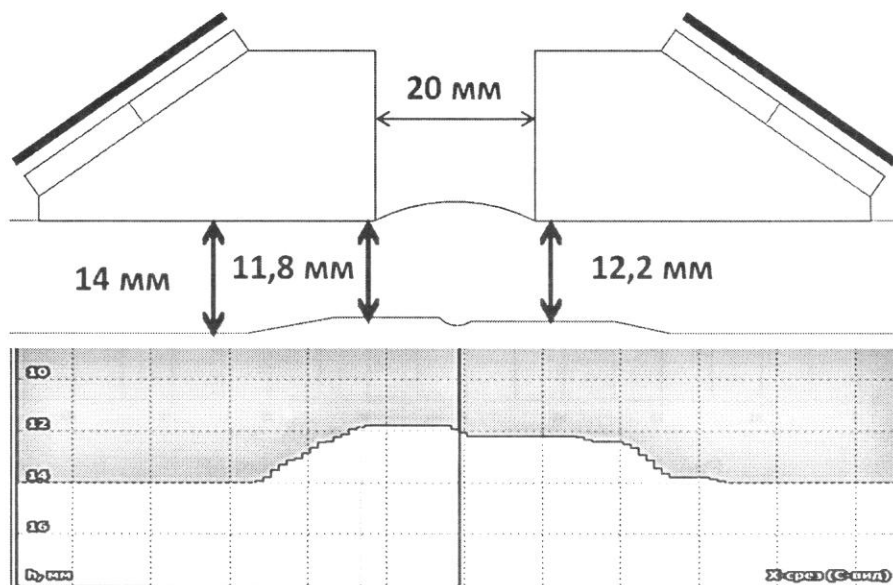


Рис. 10. Профиль донной поверхности с разнотолщинностью кромок

соответственно появляются разрывы, а при уменьшении – сужается ОВ донной поверхности. Максимум на графике соответствует оптимальной толщине для данной конфигурации АР и призм, при которой ширина ОВ будет максимальной без разрывов.

Ширина ОВ донной поверхности вычисляется следующим способом: к минимально возможной ширине ОВ, когда призмы сдвинуты вплотную, необходимо прибавить используемое значение базы. В данном случае она равна $42,5 \cdot 2 = 83$ мм, где 42,5 мм – ширина призмы с АР (см. рис. 5).

Наличие валика усиления сварного соединения ухудшает ситуацию в случаях, когда ширина валика не позволяет сдвинуть призмы на расстояние оптимальное или меньшее оптимального значения базы, вследствие чего будут появляться разрывы. Компенсировать эти разрывы можно путем дополнительного поперечного сканирования.

Заключение

1. Разработанная технология позволяет своевременно обнаружить коррозионный износ, смещение кромок, утонения, провисания, разнотолщинность и т. д. при контроле объектов с неэквидистантными внешней и внутренней поверхностями, а также измерить геометрические параметры внутренней поверхности.

2. Предлагаемая технология может найти широкое применение в ультразвуковой дефектоскопии трубопроводов и других металлоконструкций в атомной энергетике, в инфраструктуре нефтегазового транспортного хозяйства, химическом машиностроении, судостроении с неэквидистантными поверхностями объекта контроля при одностороннем доступе.

3. Учет внутренней поверхности позволит повысить достоверность и эффективность автоматизированного эксплуатационного контроля от-

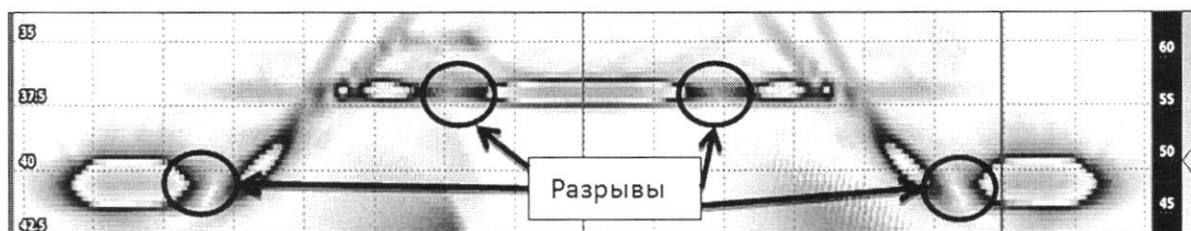


Рис. 11. Суммарное изображение профиля дна с разрывами (обозначены овалами)

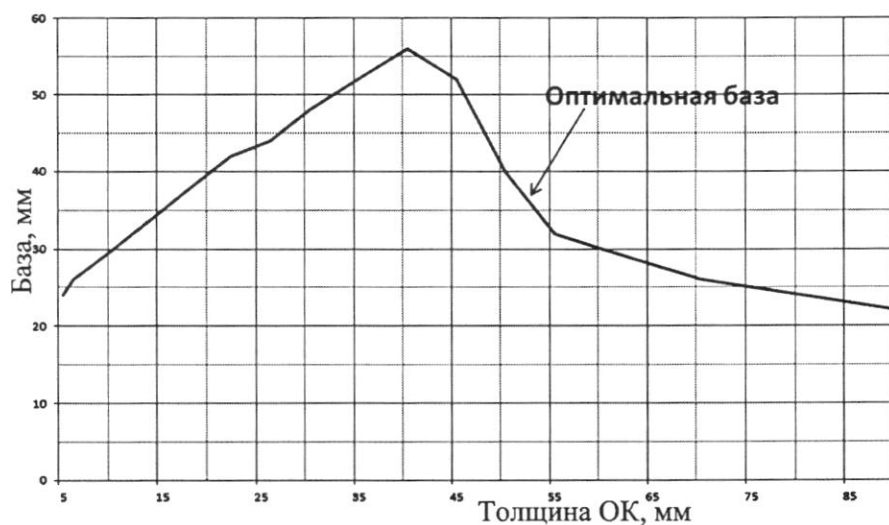


Рис. 12. Расчет оптимального положения АР

ветственного оборудования за счет получения высококачественного изображения отражателей. Технология построения профиля донной поверхности даст импульс развитию автоматизированных методов распознавания и образмеривания несплошностей.

Список литературы:

1. Гурвич А.К., Сясько В.А., Артемьев Б.В., Грудский А.Я., Федосенко Ю.К., Шевалдыкин В.Г. Толщинометрия изделий и покрытий. Методы и задачи // В мире НК. 2008. № 2 (40). С. 4.
2. Шкатов П.Н., Шатерников В.Е. Неразрушающий контроль трещин и коррозионных поражений вихретоковым методом // Контроль. Диагностика. 1998. № 2. С. 39-42.
3. Волков Б.В., Шкатов П.Н. Вихретоковый контроль металла в энергетике. – Челябинск: Цицеро, 2013. 249 с.
4. Базулин А.Е., Бенитес Х., Пронин В.В., Тихонов Д.С., Шнель О.О. Сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла и сварных швов // В мире НК. 2014. № 4 (66). С. 20-26.
5. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Бобров В.Т., Алехин С.Г., Козлов В.Н. ЭМА преобразователи для ультразвуковых измерений // В мире НК. 2008. № 2 (40). С. 22-25.
6. Юнникова В.В. О достоверности ультразвукового контроля толщины // Контроль и диагностика. 1999. № 9. С. 31-34.
7. Алехин С.Г., Самокрутов А.А., Бобров В.Т., Бобров С.В., Сергеев К.Л. Моделирование магнитных систем ЭМА-преобразователей для возбуждения ультразвуковых волн // Контроль. Диагностика. 2013. № 7. С. 12-18.
8. Rioux Ph. Comparison corrosion mapping solutions using phased array and conventional UT techniques / http://www.ndt.net/events/NDTCanada2015/app/content/Paper/18_Rioux.pdf (дата обращения: 11.08.2015).
9. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Козлов В.Н., Алехин С.Г., Мелешко И.А., Пастушков П.С. А1207 – ультразвуковой толщиномер нового поколения // В мире НК. 2001. № 2 (12). С. 23-24.
10. Introduction to phased array ultrasonic technology applications: R/D tech guideline. – Olympus NTD, 2007. 376 p.
11. Швабович К., Суворов В.А. Неразрушающий контроль и построение профиля донной поверхности при помощи методов ультразвуковой томографии / <http://www.acsys.ru/article/nerazrushayushchiy-kontrol-i-postroenie-profilya-donnoy-poverkhnosti-pri-pomoshchi-metodov-ultrazvuk/> (дата обращения: 11.08.2015).
12. Delacoux D., Trevin S., Caylar P. Weld root measurement by ToFD for inspection of flow-accelerated corrosion susceptible welds / http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/266_wcndtfinal00266.pdf (дата обращения: 09.09.2015).
13. Способ ультразвукового контроля профиля внутренней поверхности изделия с неровными поверхностями / Патент на изобретение № 2560754, приоритет изобретения 30 мая 2014 г.
14. Базулин Е.Г., Коколев С.А., Голубев А.С. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов // Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 18-32.
15. Civa 10 User Manual (UT Module), CEA, 2011.

*Виталий Владимирович Пронин,
аспирант, научный сотрудник,
Андрей Евгеньевич Базулин,
канд. техн. наук, начальник лаборатории,
Дмитрий Сергеевич Тихонов,
канд. техн. наук, технический директор,
ООО «НПЦ «ЭХО+»,
Петр Николаевич Шкатов,
д-р техн. наук, профессор,
Московский государственный университет
информационных технологий,
радиотехники и электроники (МГУИТРЭ),
г. Москва,
e-mail: pronin@echoplus.ru*

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

Союз общественных объединений
«Международное научно-техническое
общество приборостроителей и метрологов»

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

Министерства промышленности
и торговли РФ,
Федерального агентства по техническому
регулированию и метрологии,
Московского государственного
технического университета
имени Н.Э. Баумана

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Кавалеров Г.И., д.т.н., проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Акилин В.И., к.т.н., проф.;
Алексеев В.В., д.т.н., проф.;
Богомолов Ю.А., к.т.н. (зам. гл. редактора);
Кондратенко В.С., д.т.н., проф. (зам. гл.
редактора);
Еремин Е.В., к.т.н.; Ивченко В.Д., д.т.н., проф.;
Клюев В.В., академик РАН;
Кононогов С.А., д.т.н.; проф.;
Кривов А.С., д.т.н., проф.; Лахов В.М., к.ф.-м.н.;
Назаров В.Н., к.т.н.;
Прохоров Н.Л., д.т.н., проф.;
Сенянский М.В.; к.т.н.;
Слепцов В.В., д.т.н., проф.;
Соколов В.В., д.ф.-м.н., проф.;
Софиев А.Э., д.т.н., проф.;
Суминов В.М., д.т.н., проф.;
Шкабардия М.С., д.т.н., проф.;
Щепетов А.Г., к.т.н., проф.;
Яшин Я.И., д.хим.н., проф.

РЕДАКЦИЯ

Кавалерова Г.А. (зам. гл. редактора)
Воронкова А.С. (отв. секретарь)
Никулин А.А. (выпускающий редактор)

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ
по делам печати, телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1459

Журнал «Приборы» зарегистрирован
в ВАК РФ как научное издание

Сдано в набор 20.10.2015. Подписано в печать 20.11.2015.
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 7. Зак. 1027
Цена журнала – договорная

Подписной индекс
в каталоге Агентства «Роспечать» – 79727

Адрес редакции:

119034, г. Москва, Остоженка ул., д. 1/9, оф. 12
Телефон: (495) 695-10-70, 695-10-71 (факс)
E-mail: kavalеров@mail.ru http://www.pribory-smi.ru

Отпечатано в ООО «Подольская Периодика»
142110, г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

Никоненко В.А., Свирков В.А., Сапожников С.З.,
Митяков В.Ю., Митяков А.В., Гусаков А.А. Градуировка
высокотемпературных гетерогенных градиентных датчиков
теплового потока в вакууме 1

Ионов Б.П., Ионов А.Б., Чернышева Н.С., Ольшанский А.В.
Использование температурно-спектрального представления
данных для спектрально-статистической многоканальной
пирометрии 5

Бабич А.Ю., Башкатов А.В., Косолапов А.С., Зайнуллина Э.Р.,
Сероштанов В.В., Сапожников С.З. Исследование явления
обратной конденсации методами градиентной теплотрии .. 12

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Пронин В.В., Базулин А.Е., Тихонов Д.С., Шкатов П.Н.
Построение профиля внутренней поверхности трубопроводов
ультразвуковым методом с применением технологии
цифровой фокусировки антенны 16

Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А.,
Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Разработка компьютерной
интерференционной системы контроля негладких
поверхностей 26

Павлова А.С., Софиев А.Э. Стандартизация
технологических объектов многосвязного регулирования .. 32

ТЕОРИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ

Мулев Ю.В., Мулева С.Ю., Совлуков А.С. Устройство
электрофизической диагностики состояния веществ с
высокой проводимостью 38

Мордасов М.М., Шишкина Г.В. Гидростатический метод
контроля плотности жидкости 42

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Васильев Е.В., Игнатов А.А., Калинин М.И., Маркин Л.Д.
Иммерсионная составляющая неопределенности измерений
температуры эталонными термометрами сопротивления с
металлическим корпусом 45

Ягудин И.Р. Комплекс новых стандартов в области
метрологического обеспечения измерений количества
нефти 51

© Предупреждаем о правовой защите наименования, товарного знака и авторских
прав на публикуемые материалы.

За достоверность сведений в рекламных материалах ответственность несут
рекламодатели.

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются.

Перепечатка материалов допускается только с разрешения редакции и с
обязательной ссылкой на журнал «ПРИБОРЫ».