

Разработка Одноканальных Электромагнитных Акустических преобразователей и Электромагнитных Акустических Фазированных решеток для контроля Аустенитных Швов

Huidong Gao и Borja Lopez (Innerspec Technologies, Inc., Lynchburg, VA 24501.)

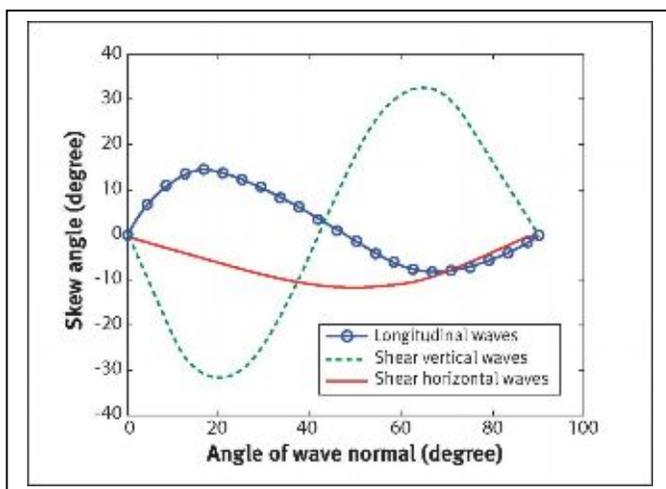
Краткий обзор

Аустенитные швы широко используются в атомной, нефтехимической и обрабатывающей промышленности. Сильная анизотропия материала и крупнозернистая структура в дендритной зоне сварного шва делает такие швы очень трудными для контроля традиционными методами. Хорошо известно, что поперечная горизонтальная волна (SH) подходит для такого контроля и что электромагнитные акустические преобразователи (ЭМАП) являются наилучшим средством для возбуждения данной моды волны, но недостаток оборудования препятствует их практическому применению. Настоящая статья представляет разработку одноканального преобразователя и преобразователя с фазированной решеткой на базе технологии ЭМАП и результаты тестов, полученные на образцах, представленных Electric Power Research Institute (EPRI). Результаты показывают потенциал нового оборудования для контроля аустенитных швов, которое открывает новые возможности для исследований и практического применения. **Ключевые слова:** ультразвук, аустенитный шов, электромагнитный акустический преобразователь.

Вступление

Аустенитные нержавеющие стали широко используются благодаря их исключительной сопротивляемости коррозии. Многие типы аустенитных сварных соединений используются в атомной и нефтехимической промышленности, а так же других высокотемпературных процессах и условиях эксплуатации.. Наиболее часто аустенитные швы появляются при сваривании двух нержавеющих сталей 300 серий, углеродистой стали и нержавеющих сталей 300 серий с высокотемпературным никель-кадмиевым сплавом или нержавеющей стали 300 серий с высокотемпературным никель-кадмиевым сплавом. Аустенитные швы имеют сильно текстурированную столбчато-кристаллическую структуру, которая рассеивает ультразвуковую энергию, и отклоняют волны, делая эти швы трудными для контроля традиционными ультразвуковыми системами (Huggell and Gray, 1985).

Наиболее часто используемая мода волны для контроля швов, поперечная вертикальная, больше всего страдает от рассеивания вследствие анизотропии аустенитной кристаллической структуры. Продольные волны рассеиваются значительно меньше в аустенитных материалах, чем вертикальные поперечные, но из



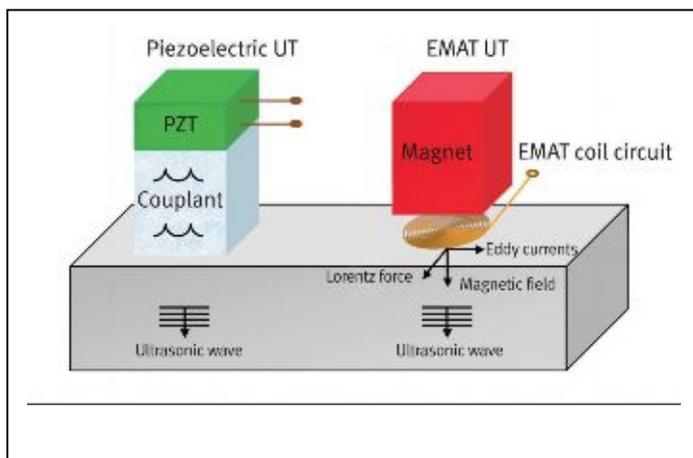
опыта, вследствие их изменения в структуре и на границах сварного шва, требуется доступ с двух сторон шва. Ранние исследования в 1980х показали, что горизонтальная поперечная (SH) мода не меняется на структурных границах, и может рассматриваться как потенциальное решение для данного типа соединений. Рис. 1 показывает отклонение волны как функцию угла преломления и угла падения, Silk (1981).

Рис. 1. Соотношение между углом падения и углом преломления по отношению к ориентации дендритной структуры аустенитного зерна. Silk (1981).

Тем не менее, энергия поперечной волны (сдвига) не проходит через контактную жидкость малой плотности и нелегко возбудить горизонтально поляризованную волну путем преобразования мод с использованием призмы, поэтому трудно генерировать такую волну используя традиционный пьезоэлектрический преобразователь и

соответственно это практически не применимо. С другой стороны ЭМАП является эффективной альтернативой для генерирования горизонтальной поперечной волны (SH) для ультразвукового контроля. Механизмом для генерации звука с использованием ЭМАП является сила Лоренца и магнитострикция. (Hirao and Ogi, 2003; Thompson, 1990). Сила Лоренца является приоритетным механизмом генерирования звука в типичных аустенитных сталях, вследствие того, что они имеют слабые магнитные свойства или не имеют их совсем.

Рис. 2 Схематично показывает генерирование звука ЭМАП с использованием силы Лоренца и сравнение с традиционным УЗ преобразователем. Типичный ЭМАП состоит из двух частей, магнита и катушки. Когда катушка возбуждается переменным током, в аустенитной стали под катушкой будет возбуждаться вихревой ток. При взаимодействии магнитного поля и вихревого тока возникает сила Лоренца. Эта сила генерирует ультразвуковые волны, которые распространяются в аустенитном материале. При обратном процессе акустическая волна при наличии магнитного поля возбуждает токи в приемной катушке ЭМАП. При



различной комбинации магнита и геометрии катушки, возможно генерировать различные типы ультразвуковых волн, включая продольные, поперечные горизонтальные и поперечные вертикальные. ЭМАП также могут генерировать прямые, наклонные и различные типы направленных волн. (Gao et al., 2010a; Gao et al., 2010b). Хотя это и не относится к теме данной статьи, отсутствие контактной жидкости, так же является привлекательным преимуществом использования ЭМАП.

Рис. 2. Принцип технологии ЭМАП в сравнении с традиционным УЗК пьезоэлектрическими преобразователями.

Идея использования ЭМАП для возбуждения ПГ волны возникала уже достаточно давно. В отчете 1985, Hudgell и Gray (1985) сделали заключение, что «развитие ЭМАП должно стимулироваться» Тем не менее, разработка ЭМАП для данного применения столкнулось с двумя серьезными проблемами:

- Аустенитные материалы имеют очень низкую проводимость, что влияет на возможность возбуждения вихревых токов, а следовательно, и звука, используя ЭМАП. В сравнении с алюминием, который так же является немагнитным материалом, и в котором возбуждение звука происходит только с применением силы Лоренца, нержавеющая сталь может иметь в 10-15 раз худшие показатели соотношения сигнал-шум при прочих равных условиях.
- Конструкция ЭМАП для генерирования под определенным углом поперечной горизонтальной волны с использованием силы Лоренца требует использования переменных магнитных полюсов. Несмотря на то, что возможности импульсных и постоянных магнитов значительно возросли в последние несколько лет, все равно остаются ограничения по размерам магнитов, меньше которых магнитное поле становится слишком слабым, и таким образом ограничивается возможность в выборе конструкций. Более того, из-за эффекта реверберации в магните и трудности, связанной с изоляцией их от катушки, угловая поперечная горизонтальная волна практически может использоваться только при схеме pitch-catch, при которой излучатель и приемник являются отдельными элементами и разделены физически.

Несмотря на множество попыток в прошлом (Hubschen et al., 1993; von Bernus et al., 1994), ЭМАП до сих пор не используются для контроля аустенитных швов.

Целью данной работы было разработка наклонного ЭМА преобразователя для поперечной горизонтальной волны, который мог быть реально использован для контроля аустенитных швов. Было намерение разработать портативную систему, которая могла бы генерировать большую энергию (до 20 kW на канал при 1 процентном рабочем цикле), использовать последние достижения в обработке сигнала и оптимизировать конструкцию сенсора путем моделирования. Данная работа так же представляет тесты и их результаты для одноканального ЭМА преобразователя и ЭМА преобразователя на фазированной восьмиканальной решетке для поперечной горизонтальной волны, проведенные на образце (core-shroud sample – кожух активной зоны) предоставленном EPRI.

Интегрированная система ЭМАП, большой мощности

В прошлом для ЭМАП обычно использовалась двухконтактная (push-pull) технология возбуждения

энергии. Такая схема обеспечивает тональную посылку тока состоящего из определенного числа циклов в излучающей катушке ЭМАП Система включается на определенный отрезок времени и затем отключается на определенный период времени, при этом происходит включение другой катушки на такой же период времени для того, что бы избежать насыщения излучателя, и затем отключение ее в конце цикла. Этот цикл возбуждает прямоугольное колебание на выходе, которое может быть трансформировано в напряжение, которое требуется для управления ЭМАП и его регулировочными компонентами.

Исторической проблемой для данной схемы является то, что она сильно ограничивает диапазон частот, для которых может быть произведен достаточный ток. Паразитические компоненты, такие как, паразитная емкость и индуктивность рассеивания, характерные для излучателя, могут так же потреблять энергию и ограничивать ток, который в любом случае должен быть передан в ЭМАП. Более того, излучатель может насытиться, если импульсы в схемах отличаются от симметричных тональных посылок, и таким образом ограничивается количество энергии поставляемой ЭМАП. В добавление к вышесказанному, данная технология не может использоваться, что бы гасить затухающие колебания ЭМАП или отражения энергии от линии излучения между источником импульса и ЭМАП. И в дополнение к этому стоимость, вес и размер источника

импульсов, в частности, когда требуется возбуждение низких частот стоимость трансформатора очень большая. Новые изобретения (запатентованные), включают электронную схему на базе технологии H-bridge, которая позволяет производить большую выходную мощность, имеет повышенную эффективность, шире диапазон частот, снижает шумы и имеет значительно уменьшенную конструкцию источника импульсов по сравнению с источником радиочастотных импульсов использовавшемся в ЭМАП. Рис. 3 показывают электрическую схему технологии H-bridge. Нагрузка в центре схемы является катушкой ЭМАП. Базовая H-bridge схема была модифицирована и дополнена главным образом переключающими устройствами.

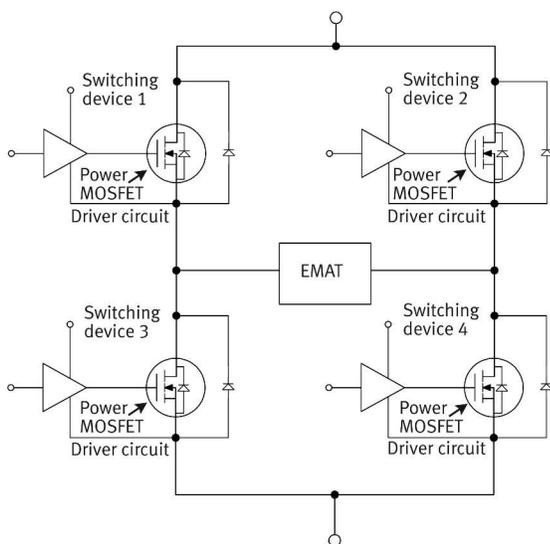


Рис. 3. Схема H-bridge.

Например, мощный металло-оксидный полупроводник полевого транзистора (MOSFETs), в параллели с некоторыми или со всеми ветвями конфигурации H-bridge. Управление схемами и последовательность импульсов разрабатывалась с учетом улучшения стабильности, равномерного распределения подачи тока на нагрузку между переключающими устройствами и генерирование выходной формы волны, которая улучшает работу ЭМАП.

Вторым пунктом улучшения стабильности было использование высокоскоростного цифрового процессора сигналов с интегрированной вентиляционной матрицей (FPGA), что позволяет проводить сбор данных на высоких скоростях, включая алгоритмы обработки сигнала, которые улучшают соотношение сигнал шум и обеспечивают непрерывность получения и сохранность информации. Возможность выполнения этих алгоритмов позволяет значительно улучшить качество результатов.

Одноканальная конструкция и результаты

Принцип управления лучом в одноканальном ЭМАП

Среди прочих возможных конфигураций ЭМАП, использовалась постоянная магнитная решетка для генерирования наклонной поперечной горизонтальной волны в аустенитном материале с использованием силы Лоренца. Переменные магнитные полюса создавали силу Лоренца на поверхности материала. Волны, сгенерированные от всех магнитных полюсов взаимодействовали между собой под углом θ , показанном в уравнении 1,

$$(1) \quad \sin \theta = \lambda/D = v/fD$$

можно изменять направление луча поперечной горизонтальной волны, используя определенные частоты. Была разработана программа, которая имитировала форму передающего луча из ЭМАП с использованием

техники распределенного источника. Эта программа обеспечивает более детальное представление профиля луча, чем уравнение 1. Рис. 5 показывает 4 ситуации управления лучом, когда период магнитного полюса 6.35 mm. Диаграммы 5a и 5b для частот равных 750 и 650 kHz. Угол падения уменьшается при увеличении частоты. Тем не менее, имелось ограничение в управлении по минимальному углу, меньше которого, основной лепесток становится сильнее при большем угле, чем при ожидаемом. Угол для первого основного лепестка показан в уравнении 2,

$$(2) \quad \sin(\theta_1) = 3\lambda/D = 3v/fD$$

Поэтому минимальный практический угол падения без значительного основного лепестка показан в уравнении 3

$$(3) \quad f = 3v/D$$

и $\theta = 20^\circ$.

Диаграмма 5c показывает пример формы луча с боковым лепестком, когда частота равна 1600 kHz.

Меньшая критическая частота возможная для управления лучом появляется при $\theta = 90^\circ$, уравнение 4,

$$(4) \quad f = v/D$$

Так как θ зависит от частоты возбуждения (f), Если частота ниже, чем эта, то не появятся никаких основных лепестков в интересующем нас месте. Диаграмма 5d показывает форму луча подповерхностной поперечной горизонтальной волны при частоте 500 kHz.

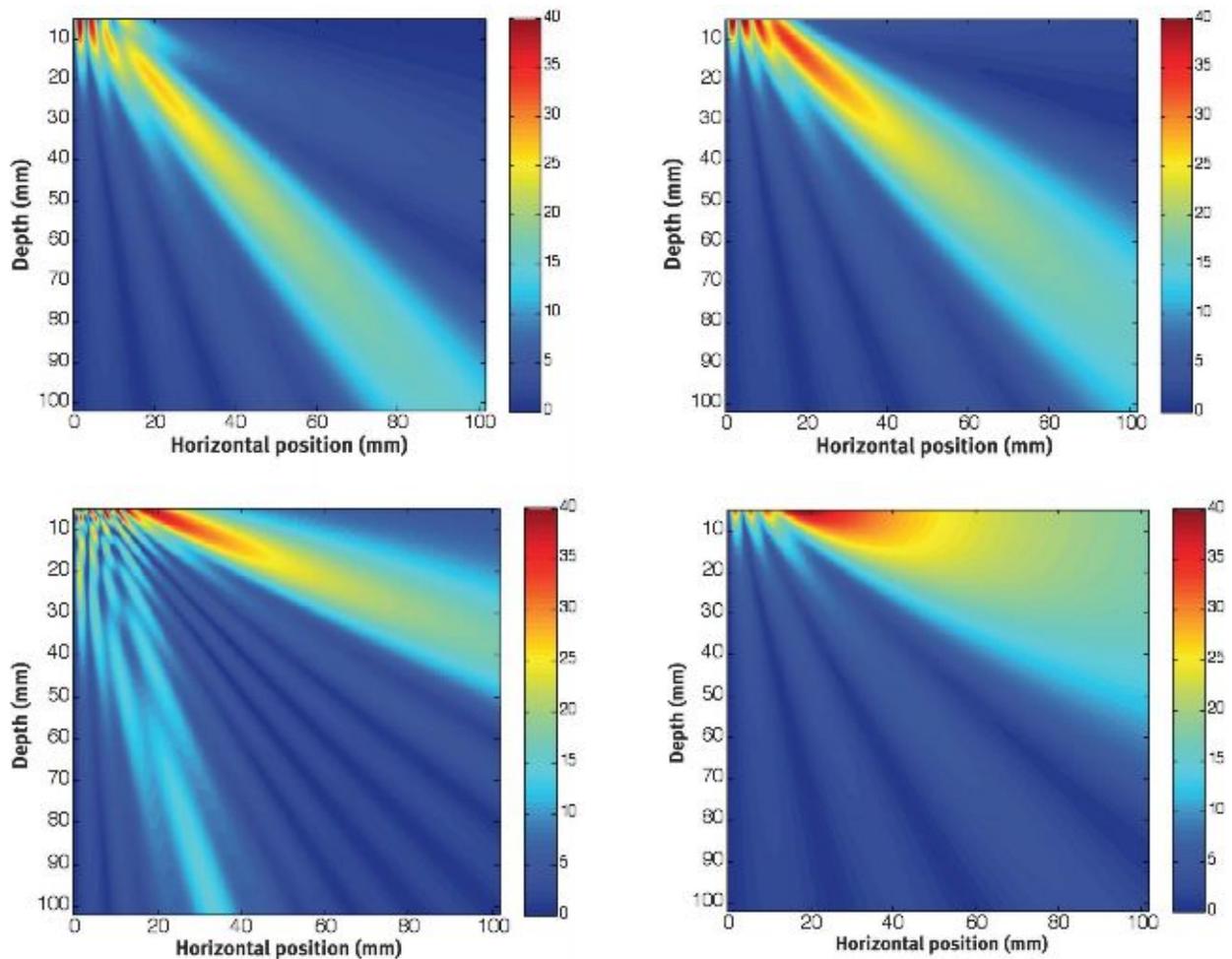


Рис. 5. Примеры управления углом луча и формы луча: (a) 750 kHz (в.лев.); (b) 650 kHz (в.пр.); (c) 1600 kHz (н.лев.); (d) 500 kHz (н.пр.).

Контроль управления лучом

Проверка управление лучом наклонного ЭМАП для поперечной горизонтальной волны, проводилось на образце толщиной 38,1 мм из аустенитной нержавеющей стали. Тест проводился при фиксированных расстояниях, 76,2, 88,9, 101,6, 114,3 и 127 mm, между излучателем и приемником и при этом частота возбуждения менялась от 500 до 800 kHz. Результаты на рис. 6 показывают, что при увеличении расстояния, требуется меньшая частота для отражения от задней стенки и получения сигнала приемником. Двукратно отраженный сигнал (два пика) был так же зафиксирован при большей частоте (127 mm) разделения.

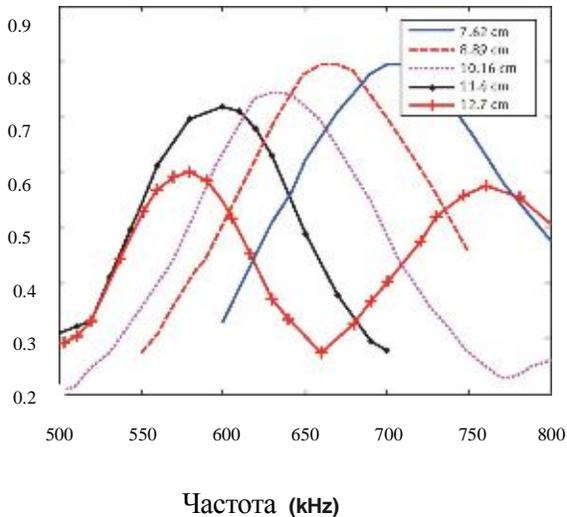
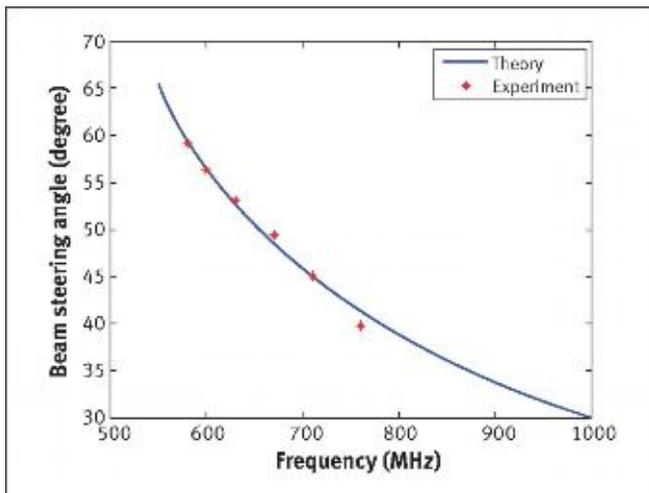


Рис. 6. Результаты изменения частоты при различных расстояниях между излучателем и приемником (по вертикальной оси амплитуда).



Была зафиксирована частота, при которой достигается максимальная амплитуда, и был рассчитан угол управления лучом с использованием тригонометрии. Рис. 7 показывает очень высокую корреляцию между теоретическим расчетом и экспериментом.

Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов.

Результаты теста одноканального преобразователя

Рис. 8a и 8b показывает фото и схематичное изображение сенсоров, которые используются для схемы тандем. Излучатель расположен за приемником и посылал сигнал, который достигал шва после двукратного отражения и затем сигнал возвращался от шва в приемник. Расстояние между излучателем, приемником и швом регулировалось в зависимости от частоты, так как угол не менялся.

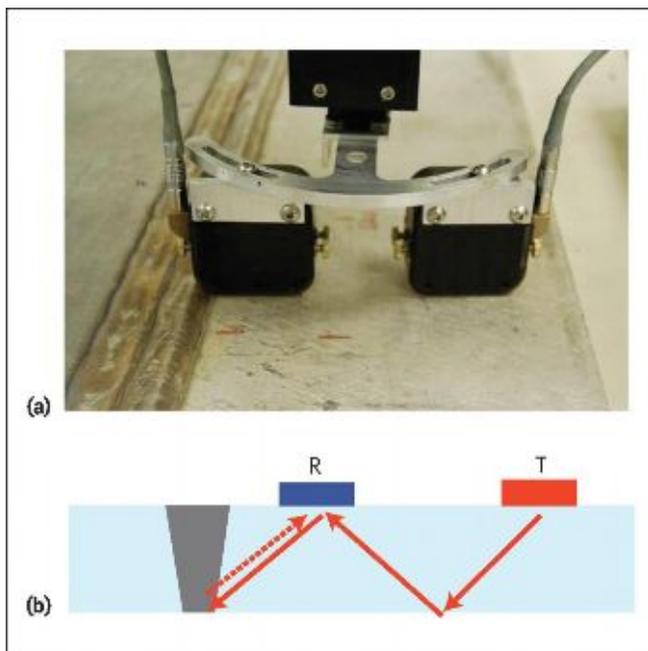


Рис. 8. Одноканальный сенсор в схеме тандем (а) сборка; (b) схема.

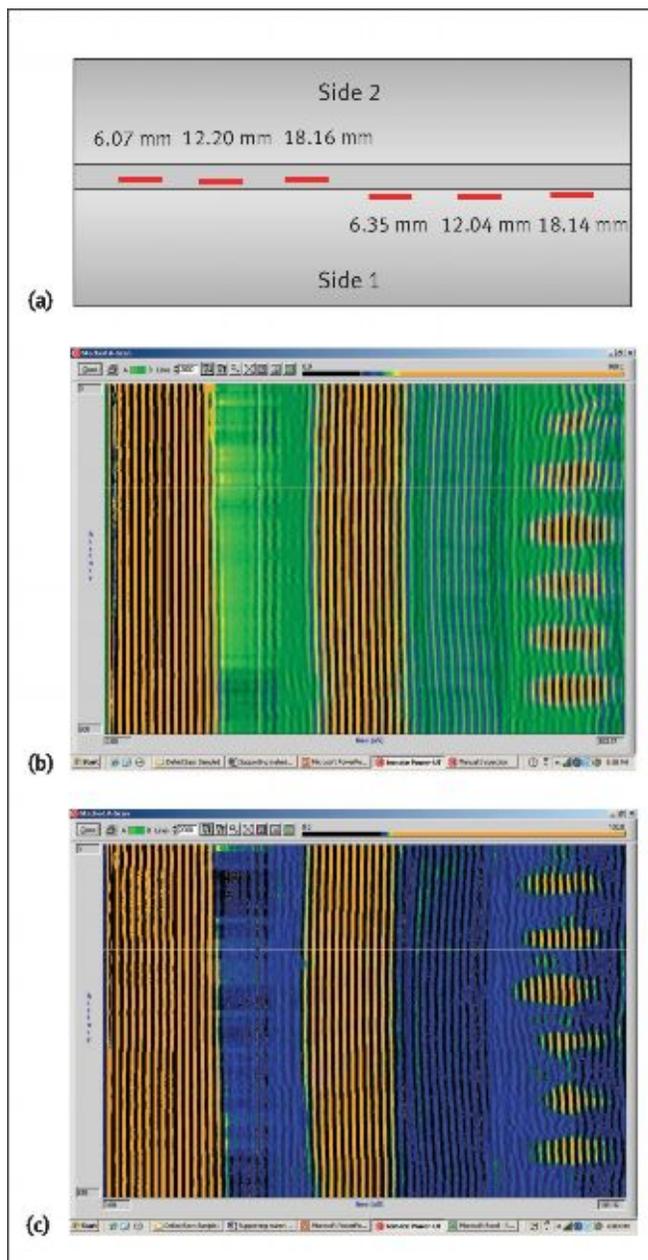


Рис.9а, b и с показывают глубину залегания и месторасположение несплошности в тестовом образце толщиной 38.1 mm и результаты теста. Все несплошности были длиной 25.4 mm и прорезаны в нижней части плиты. Три из них находились в зоне шва и три в зоне термического влияния (HAZ). При контроле со стороны 1, три несплошности со стороны донной поверхности находились на той же стороне шва, что и преобразователи. Соответственно, при контроле со стороны 2 три несплошности со стороны донной поверхности находились на противоположной, от преобразователей, поверхности шва. Интересующая область в расположенном друг над другом A-scan изображении была заключена в прямой угол. Контроль на обоих сканах проводился слева направо, и результаты представлены от верхней части к нижней. Все несплошности определялись с любой стороны шва. Месторасположение несплошности можно так же определить по времени прибытия отраженного сигнала. Когда несплошность располагается на противоположной стороне шва, отраженный сигнал проходит большее расстояние, таким образом, отраженная волна приходит позже для трех нижних несплошностей.

Рис. 9. Схематичное изображение образца и результаты теста (контроль выполнялся слева направо в обоих случаях, и результаты показаны от верхней части к нижней): (а) схема образца; (b) контроль со стороны 1; (с) контроль со стороны 2.

ЭМАП на базе фазированной решетке

Принципы ЭМАП на базе фазированной решетке

Восьмиканальный ЭМАП на фазированной решетке был сконструирован с использованием решетки из постоянного магнита на основе неодим борного железа. В некоторых предыдущих экспериментах тестировалась импульсная электромагнитная решетка, но не обеспечивалась стабильность и гарантия результата из-за очень сложной конструкции сенсора и приборов. Решетка крепилась к гибкой радиочастотной катушке, которая позволяла легко адаптироваться под кривые поверхности. Сенсоры монтировались на приспособление, которое в определенных пределах контролировало угол между излучателем и приемником и расстояние до шва. Используя специальное ПО для формирования луча, были определены угол и позиция сенсоров для получения наилучшего результата.

Каждый канал контролировался независимо в соответствии с фокальными законами излучателя и приемника.

Одним из основных отличий от традиционной системы с пьезоэлектрическим преобразователем для вертикальной поперечной волны, является то, что в данном случае нет никаких преобразований поперечной горизонтальной волны в другие моды, что дает возможность намного более широко изменять (качать) угол. Для данного случая секторное сканирование покрывало углы от 20 до 90 градусов, что позволяет контролировать материал вплоть до поверхности контроля. Рис. 10 показывает результаты четырех разных сканов

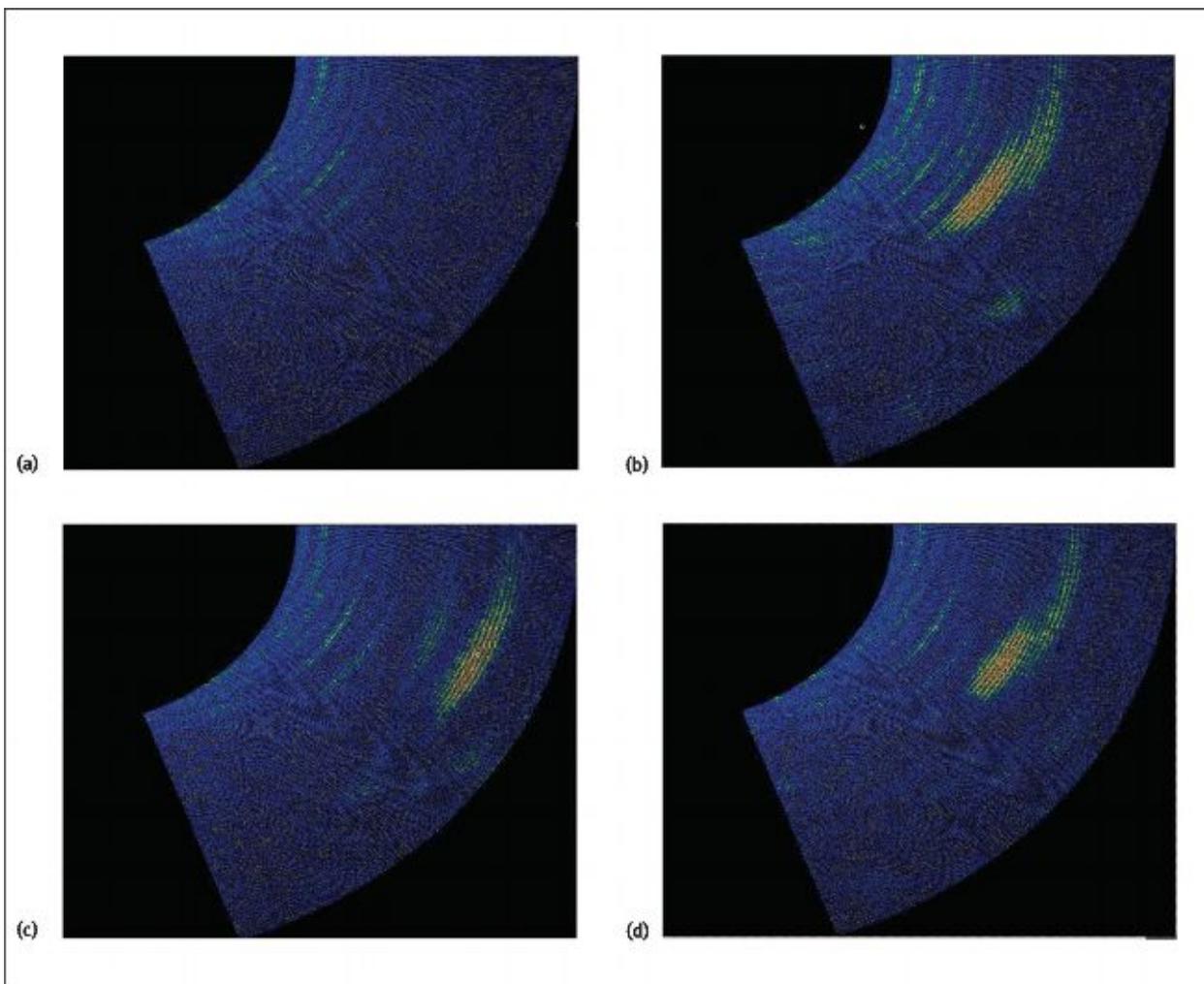


Рис. 10. Результаты секторного сканирования с использованием фазированной решетки: (а) без дефектов; (b) 6.35 mm глубокий пропил в шве; (с) 6.35 mm глубокий пропил в ЗТВ ближняя сторона; (d) 6.35 mm глубокий пропил в ЗТВ дальняя сторона.

на образце со сварным швом толщиной 38.1 mm: а) первоначальный материал без дефектов; б) Несплошность

длиной 6,35 mm в зоне сварного шва; с) 6.35 mm несплошность в зоне термического влияния со стороны сенсора; d) 6.35 mm несплошность в зоне термического влияния на другой стороне сварного шва. Несплошности определены с хорошим соотношением сигнал-шум для всех трех случаев. Хотя определение размера несплошности при использовании фазированной решетки, находится в стадии разработки, месторасположения несплошностей может легко определяться по их месторасположению на диаграмме секторного сканирования.

Заключение

Настоящая статья представляет последние разработки для применения технологии ЭМАП для контроля толстых аустенитных швов с использованием новых мощных, интегрированных, восьмиканальных электронных блоков и оптимизированных наклонных сенсоров для поперечной горизонтальной волны

Результаты тестов показывают, что данная новая портативная система позволяет находить все несплошности в различных моделях аустенитных швов с обеих сторон шва. В настоящем отчете представлены некоторые результаты, полученные на образце толщиной а 38.1 mm. В добавление к этому, нужно отметить, что и одноканальная система и система с фазированной решеткой позволяют изменять угол луча в интервале от 20 до 90 градусов, что дает новые возможности, которые нельзя получить при использовании пьезоэлектрических преобразователей.

После 30 лет работы, это новое оборудование предвещает новую эру в контроле аустенитных швов, при которой ЭМАП могут превратиться из лабораторного оборудования в оборудование, используемое на рабочих площадках, и выполнение реального контроля позволит усовершенствовать данное оборудование.

Дальнейшая работа будет направлена на улучшение расшифровки сигнала и улучшение техники определения размеров, а также добавление возможностей для использования оборудования при высоких температурах.

Литература.

- Dube, Noel, "Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications," Quebec, Canada, R/DTech, 2004.
- Gao, Huidong, Syed Ali and Borja Lopez, "Efficient Detection of Delamination in Multilayered Structures Using Ultrasonic Guided Wave EMATs," *NDT&E International*, 2010a.
- Gao, Huidong, Syed Ali and Borja Lopez, "Inspection of Austenitic Weld with EMATs," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 29B, 2010b, pp. 1175-1181.
- Hirao, M. and H. Ogi, *EMATs for Science and Industry-Noncontacting Ultrasonic Measurements*, Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Hubschen, G., H.J. Salzburger, M. Kroning, Bernus L. von and Oellrich, K., *Results and Experiences of ISI of Austenitic and Dissimilar Welds Using SH-Waves and EMUS-Probes*, Elsevier Science Publishers, 1993, Conference Transaction SMiRT-12, 1993, pp. 249-254.
- Huggell, J. and B.S. Gray, "The Ultrasonic Inspection of Austenitic Materials – State of the Art Report," Warrington, England, Risley Nuclear Power Development Laboratories, 1985.
- Silk, M.G., "A Computer Model for Ultrasonic Propagation in Complex Orthotropic Structures," *Ultrasonics*, 19, 1981, pp. 208-212.
- Thompson, R.B. "Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers," *Physical Acoustics*, Vol. 19, 1990, pp. 157-199.
- von Bernus, Ludwig, Werner Rathgeb, Rudi Schmid, Friedrich Mohr and Michael Kroning, "Current In-service Inspection of Austenitic Stainless Steel and Dissimilar Metal Welds in Light Water Nuclear Power Plants," *Nuclear Engineering and Design*, 151, 1994, pp. 539-550.