



Контроль Аустенитных Швов с применением Фазированных решеток

Huidong Gao, Syed Ali, and Borja Lopez
Innerspec Technologies, Inc
4004 Murray Place, 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 делают данный вид сварных швов очень трудными для контроля традиционными методами. Известно, что Поперечная Горизонтально (ПГ) ориентированная волна очень хорошо подходит для данного вида контроля, и технология с применением ЭМАП является наилучшей для генерирования этого типа волн, но отсутствие необходимого оборудования препятствовало использованию данной технологии за пределами исследовательских лабораторий. В данной статье представлено новое оборудование для работы с ЭМАП с Фазированной решеткой и сенсор с ЭМАП, типа тандем, а так же результаты, полученные на толстых сварных конструкциях из нержавеющей стали. Результаты подтверждают обоснованность применения данной технологии и оборудования, которое открывает новые возможности как для использования в исследовательских целях, так и для практического применения.

Ключевые слова: Ультразвук, Аустенитный шов, ЭМАП, Фазированная решетка, Тандем.

1. Вступление

Аустенитная сталь широко используется в атомной и нефтехимической промышленности, а так же в других процессах, связанных с высокими температурами, вследствие своей высокой сопротивляемости коррозии. Из большого числа типов аустенитных соединений, наиболее часто встречаются соединения между нержавеющей сталью, нержавеющей и углеродистыми сталями с применением сплава инконель (*жаропрочный и жаростойкий сплав на никелевой основе*), и соединения нержавеющей стали 300 серии со сплавом инконель. Аустенитные швы имеют колоннообразную структуру зерна, которая рассеивает ультразвуковую энергию и отклоняет волны, и тем самым делает их очень трудными для контроля с применением традиционных ультразвуковых систем. [1].

Основным типом волн, применяемых для контроля швов, является Поперечная Вертикальная волна, которая подвергается наибольшим отклонениям из-за анизотропной структуры аустенитных кристаллов. Продольная волна отклоняется значительно меньше, чем Поперечная Вертикальная волна в аустенитных материалах, но все равно происходит значительная конверсия моды волны на границе шва и основной структуры материала и поэтому требуется доступ ко шву с двух сторон. Ранние исследования в 1980-х, показали, что Поперечная Горизонтальная волна не конвертируется в другие моды на структурных границах и таким образом является потенциальным решением для контроля такого типа швов [2].

Тем не менее, сдвиговая энергия не проходит через контактную жидкость с низкой плотностью, и поэтому волна с горизонтальной поляризацией не может быть получена при использовании призмы для преобразования моды волны, и таким образом, очень сложно генерировать такую волну традиционным способом с применением пьезоэлектрических преобразователей и такой способ не может быть применен на практике. С другой стороны Электрический Магнитный Акустический Преобразователь (ЭМАП) является эффективной альтернативой для генерирования ПГ (поперечной горизонтальной волны) для ультразвукового контроля. Механизмами для генерирования звуковой волны с применением ЭМАП являются сила Лоренца и магнитострикция. [3, 4]. Сила Лоренца является основным механизмом для генерирования звуковой волны в традиционных аустенитных сталях, поскольку они имеют слабую намагниченность.

Рис.2 показывает схему генерирования звука с использованием ЭМАП с применением силы Лоренца и сравнение с традиционным пьезоэлектрическим преобразователем. Типичный ЭМАП состоит из двух частей, магнита и катушки. Когда катушка возбуждается электрическим током, вихревые токи генерируются в аустенитной стали под катушкой. Взаимодействие между вихревым током и магнитным полем генерирует силу Лоренца. Эта сила генерирует ультразвуковые волны, которые распространяются в аустенитном материале. В свою очередь при обратном процессе, упругие волны, при наличии магнитного поля, возбуждают токи в принимающей катушке ЭМАП.

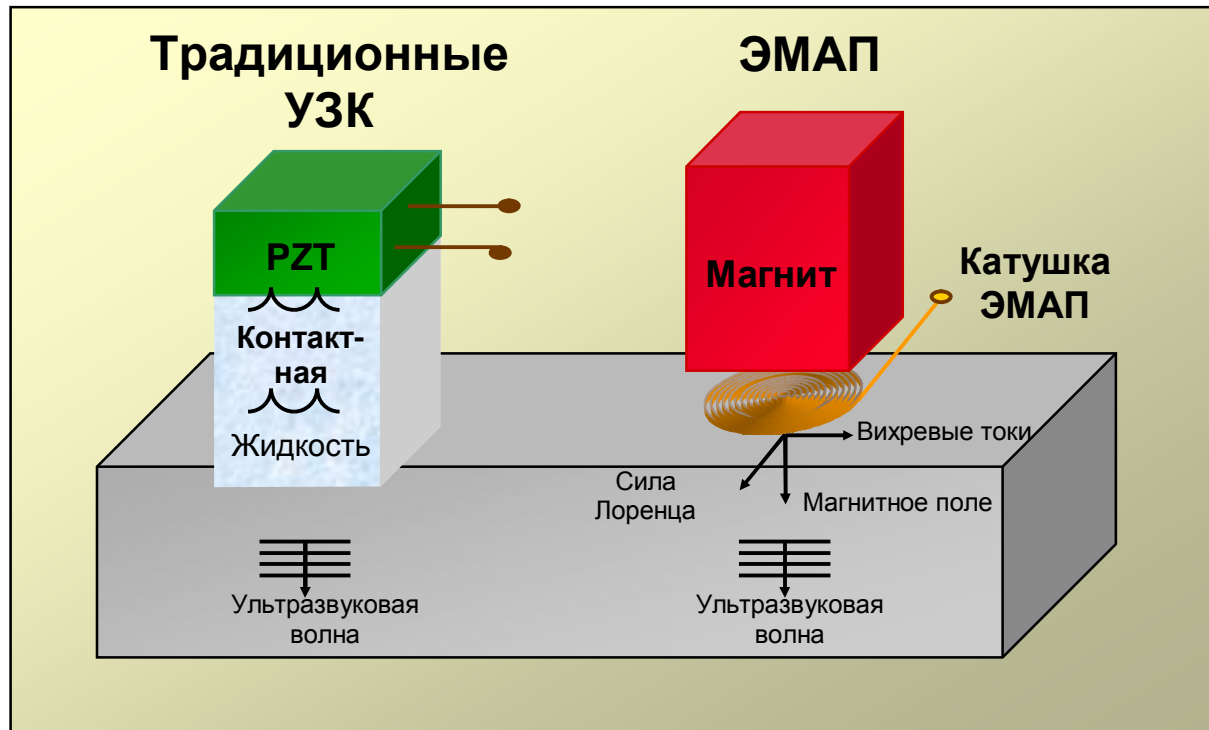


Figure 1: Принцип работы ЭМАП с применением силы Лоренца и сравнение с пьезоэлектрическим преобразователем для генерирования прямого луча.

Идее применения ЭМАП для генерирования ПГ волны для контроля аустенитных сталей более двух десятков лет. В отчете 1985 "The ultrasonic inspection of austenitic materials -State of the art report", Hudgeell и Gray [1] уже заключали, что "Разработка ЭМАП должна поощряться". Тем не менее, при разработке ЭМАП для данного применения нужно было преодолеть две серьезные проблемы:

- Аустенитные материалы имеют очень низкую проводимость, что влияет на возможность генерирования вихревых токов, а следовательно, и звуковых волн, с применением ЭМАП. В сравнении с алюминием, ещё одним не магнитным материалом, в котором генерирование с помощью ЭМАП происходит за счёт использования силы Лоренца, нержавеющая сталь может иметь в 10-15 раз большее сопротивление, что пропорционально влияет на соотношение сигнал-шум.
- Конструкция ЭМАП для генерирования наклонной ПГ волны с использованием силы Лоренца требует использования альтернативных магнитных полюсов. Хотя способности и возможности импульсных и постоянных магнитов значительно увеличились за последние несколько лет, тем не менее, есть ограничение по размеру магнитов, под которыми магнитное поле становится слишком слабым, что ограничивает возможности конструкций. Более того, из-за звенящего эффекта в магнитах и трудности их изолирования от катушки, на практике, ПГ волны, под углом, могут генерироваться только при использовании конструкции, когда излучатель и приемник являются отдельными преобразователями, разделенными физически, по схеме «pitch-catch».

Несмотря на многочисленные попытки в прошлом [7, 8], ЭМАП так и не получил практического применения для контроля аустенитных швов. Являясь лидерами в технологии с применением ЭМАП, инженеры и разработчики компании Innerspec работают над этой проблемой с 2003г. В отчете в 2010 году, мы представили 8-ми канальный прибор с возможностью получения до 20 kW на одном канале, а так же преобразователь с фазированной решеткой для контроля ПГ наклонной волной по схеме «pitch-catch» [9]. В этом документе, мы представили новый сенсор ЭМАП типа «тандем» на фазированных решетках и результаты, полученные при его применении. Данное оборудование было протестировано несколькими международными корпорациями и институтами, которые работают в атомной промышленности, и оборудование продемонстрировало возможность надежного выявления всех дефектов в представленных 6 различных образцах.

2. Описание системы для контроля

2.1. 8-ми канальный прибор большой мощности для работы с ЭМАП на фазированных решетках.

Традиционным недостатком ЭМАП является его низкая эффективность в генерировании и приеме звуковой волны. Как следствие, системы ЭМАП обычно генерируют сигнал с меньшей амплитудой и требуют более мощной электроники для возбуждения сигналов, снижения шумов и специальный алгоритмы обработки сигнала для улучшения соотношения сигнал-шум. Одной из наших запатентованных инноваций является новый усилитель с технологией H-bridge, который позволяет получать наибольшую энергию, эффективность и более широкий спектр частот по сравнению с другим оборудованием на рынке. На рисунке 2 показан **temate® PowerBox 8**, который использует данную технологию для получения 2000Vpp или 20kW пиковой мощности на канал при 1% рабочем цикле, при частотах от 100kHz до 7MHz. Два встроенных датчика пути (X-Y), и 12 программируемых Вх./Вых. Позволяют интегрировать данное оборудование со сканерами и другими внешними устройствами. Контроль прибором осуществляется внешним компьютером через интернет порт. Компьютер включает наше программное обеспечение **PowerUT®** с собственными фильтрами и другими устройствами, разработанными специально для технологий с применением ЭМАП.



Рис. 2: temate® PowerBox 8 EMAT Phased Array Probe

Фазированные решетки широко используются в ультразвуковом контроле для получения высокой чувствительности и разрешающей способности. Фазированные решетки ЭМАП используют серии ВЧ катушек, по аналогии с пьезоэлектрическими материалами, которые вместе составляют пьезоэлектрическую фазированную решетку [10]. Мы экспериментировали с несколькими конструкциями фазированных решеток ЭМАП, включая гибкую электромагнитную решетку (US

Patent 7,165,453), двух сенсорную конструкцию с угловой решеткой для работы по схеме «pitch catch», и комплект низкопрофильных постоянных магнитов в конфигурации «тандем». Каждая конструкция имеет свои преимущества, но сенсор по схеме «тандем» с размером рабочей зоны 25mm на 50mm, представляется идеальной конфигурацией для использования на трубах из-за его уменьшенных размеров и простоты в использовании.

На рис. 3 показано управление лучом в фазированной решетке «тандем» при работе по схеме «pitch catch». Восемь излучателей с независимой задержкой по времени возбуждают волны, которые пересекаются между собой в точке фокусировки для получения волнового поля большой интенсивности. Отражённый сигнал из области фокусировки приходит на каждый элемент в разное время, и задержка по времени соответствует фокальным законам таким образом, что сигнал из зоны фокусировки суммируется. В результате, ультразвуковой луч может управляться в заранее определенной области. Без эффекта преобразования мод, ПГ волны могут фокусироваться в любой области и под любым углом, и могут использоваться как для контроля прямым лучом, так и для контроля наклонным лучом.

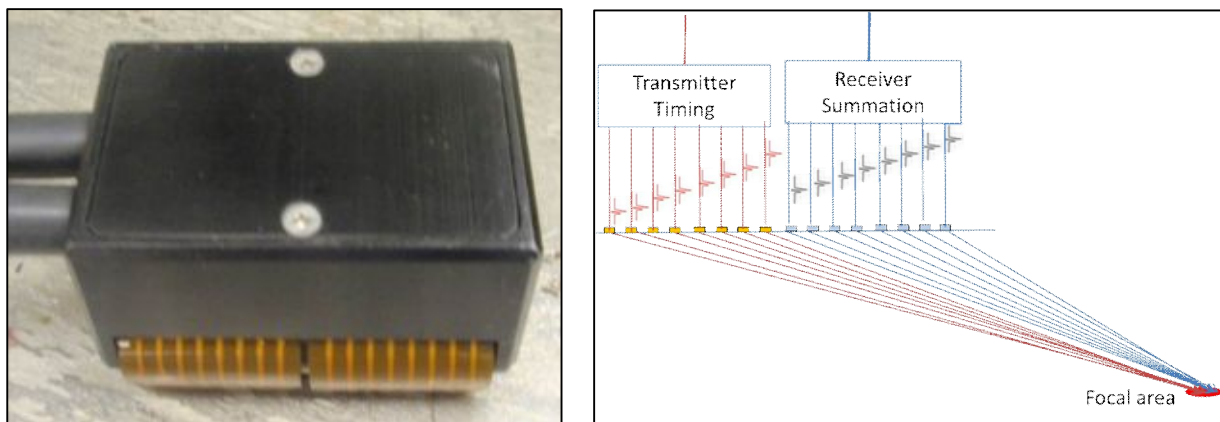


Рис. 3: Сенсор ЭМАП с фазированной решеткой, и принцип фокусировки луча.

2.2. Конфигурация системы



Рис 4: Основные компоненты системы для контроля с применением ЭМАП

На Рис 4 показаны компоненты нашей системы для применения ЭМАП на фазированных решетках. Система включает компьютер, электронный блок **temate® PowerBox 8**, 8-ми канальный блок согласования сигналов, сенсор в сборе и соединительные кабели.

Рис. 5 показано движение информации между компонентами системы. Пользователь вводит в компьютер все контролируемые параметры, включая частоту тональных посылок и продолжительность импульса. Прибор получает эту информацию и генерирует низковольтную последовательность импульсов, которая затем усиливается до высоковольтной, и через блок согласования сигналов, подается на излучатель. При высоковольтном возбуждении, преобразователь генерирует звуковую волну, которая переносится в материал. Приемник принимает ультразвуковые волны и конвертирует их в электрические сигналы. Эти сигналы усиливаются и фильтруются в блоке согласования сигналов и после этого пересылаются в электронный блок, в котором происходит их дальнейшая обработка. Затем сигнал оцифровывается и посылается в ПК для дальнейшей обработки, если необходимо, воспроизведения на экране и сохранения.

В дополнение к обработке основного сигнала, компьютер так же может работать с другими системами для автоматического контроля (старт, стоп и сигнализация).

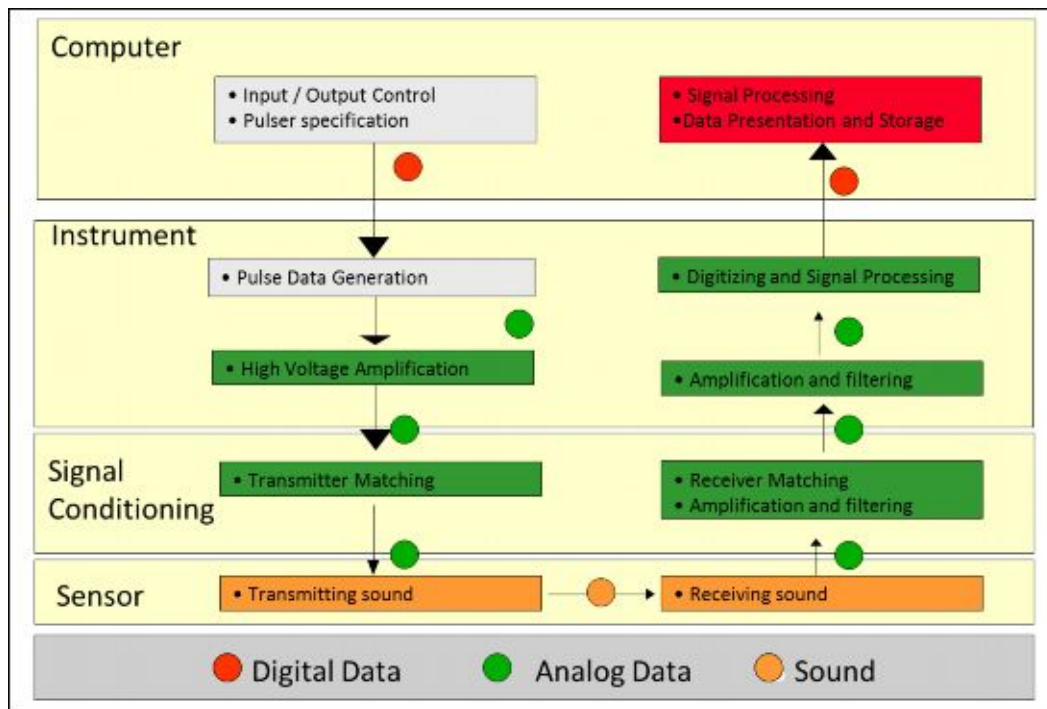


Рис. 5: Схема передачи информации внутри системы для контроля.

2.3. Установки для теста

Для наших лабораторных тестов, сенсор крепился к трёх координатному сканеру XYZ с устройством, которое позволяло сенсору свободно качаться и адаптироваться под различную кривизну образцов. Рис 6 показано устройство и сенсор на тестовом образце.

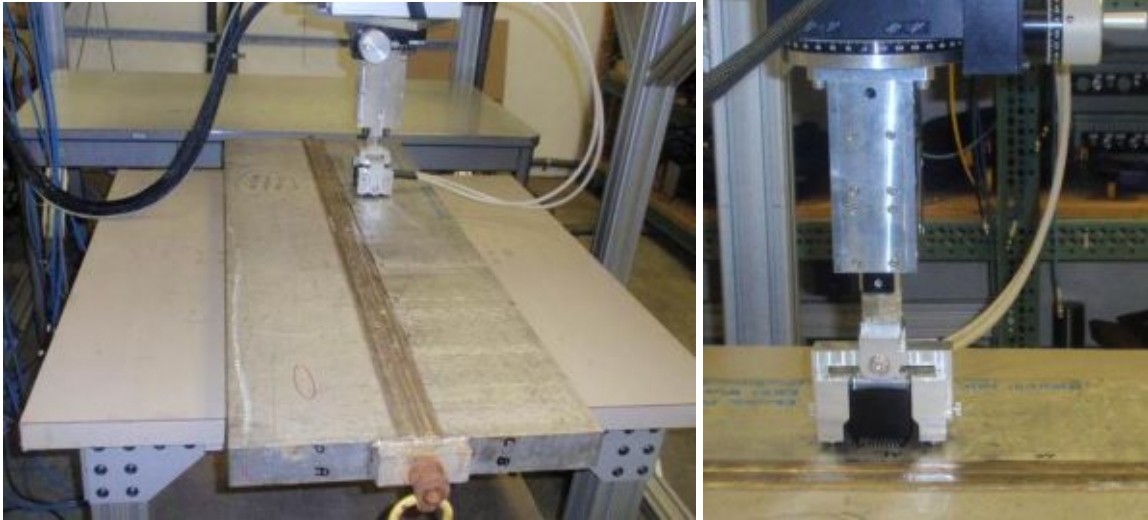


Рис 6: Конфигурация тестовой системы: (а) Образец, (b) Механическое приспособление.

3. Результаты тестов

3.1. Описание образца

Образец, показанный на рис.6, представляет собой типичный аустенитный шов в атомной промышленности. Толщина образца 50mm. В образце находятся 6 искусственных дефектов, типа усталостных трещин, в Зоне Термического Влияния (ЗТВ), расположенных с одной стороны шва, как показано на рис. 7. Дефекты А, С, и Е имеют длину, приблизительно 3" (76.2mm), а В, D, и F имеют длину приблизительно 2" (50.8mm). Глубина дефектов в процентном отношении к толщине образца составляет 39%, 10%, 59%, 2%, 39%, и 24% соответственно. Для этих тестов, образец располагался таким образом, что бы дефекты рассматривались как дефекты на внутренней поверхности (Внутреннем Диаметре (ВнтД)) шва.

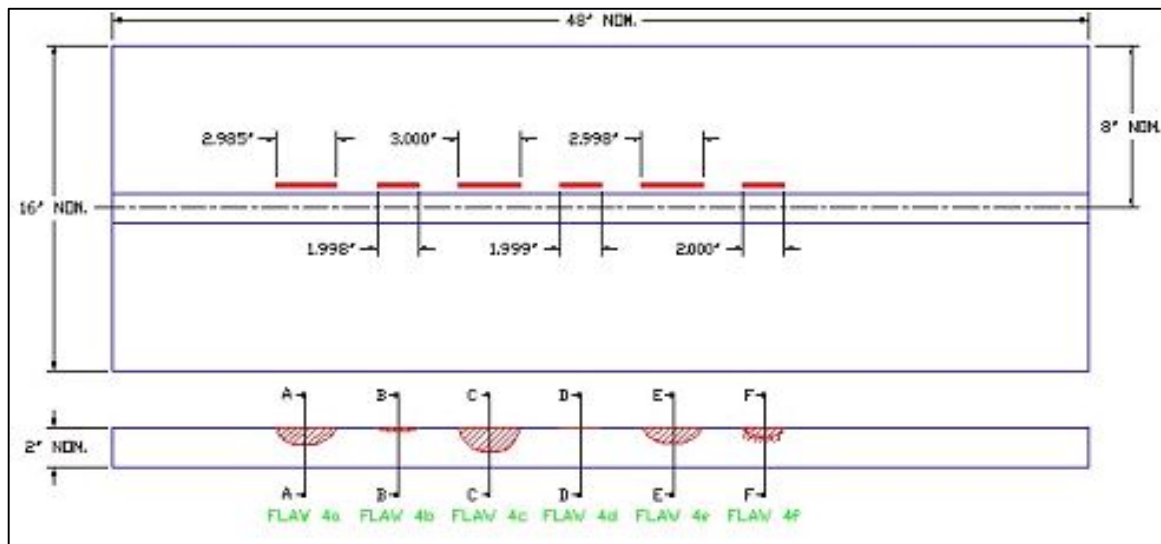


Рис 7: Дефекты в тестовом образце

3.2. Результаты

Наиболее общей и наглядной схемой предоставления результатов с применением фазированной решетки, является секторное сканирование (S-Scan), при котором управление углом падения луча, происходит таким образом, что бы обеспечить покрытие определенной области при использовании различных фокальных законов. В традиционном, контактном УЗК, фазированные решетки генерируют продольную УЗ волну в преобразователе, которая может быть использована сама по себе, или конвертироваться в ПВ (поперечную вертикальную) волну при применении преломляющей призмы. Вследствие происходящего конвертирования между продольной и поперечной волнами, продольная волна может использоваться при контроле под углом $\pm 30^\circ$ от нормали, в то время как контроль поперечной волной обычно проводится под углами от 30° до 70° .

Поперечная горизонтальная волна, в изотропных материалах, практически не подвергается преобразованию в другие моды. Для аустенитных материалов, ПГ волна так же не претерпевает значительной конвертации в какие-либо другие моды. Результатом этого является возможность сканирования под любым углом от 0° до $\pm 90^\circ$. Для данных тестов, сканирование проводилось под углами от 0° до $+90^\circ$ для определения дефектов в основном материале и ЗТВ.

На рис.Рис. 8 секторные сканы, полученные на дефекте А с обеих сторон шва. Отраженный сигнал на 0° представляет многократное отражение от донной поверхности. Отражения, полученные под углом, показывают расположение дефекта. Ключевым результатом данного теста, является то, что показана возможность надежного определения дефектов с любой стороны шва, благодаря возможности ПГ волны проникать в аустенитные материалы. Возможность контроля с одной



стороны очень желательна при трудности или невозможности контроля с другой стороны. Система имеет возможность уверенного определения паза глубиной 4mm (2%)с обеих сторон шва.

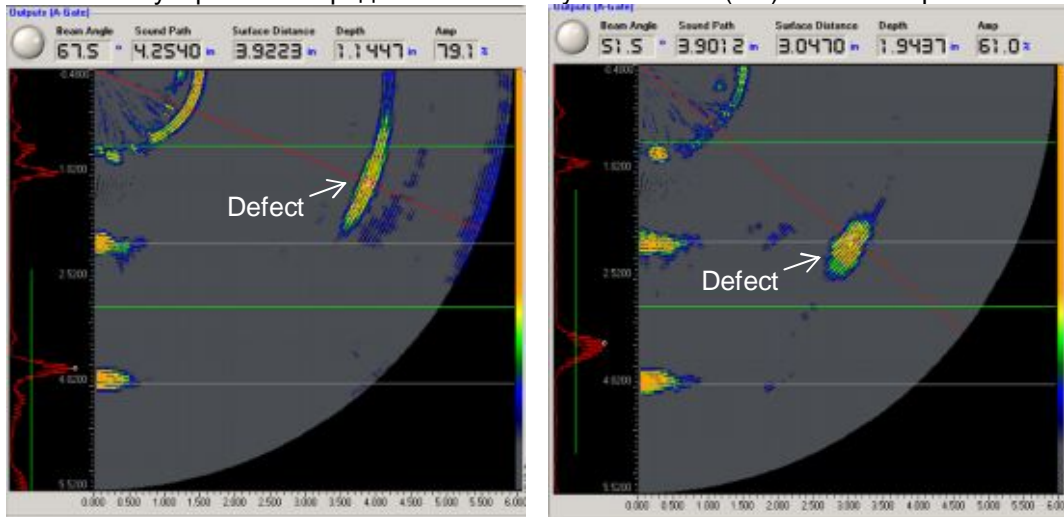


Рис. 8: Секторный скан от дефекта А: (а) Со стороны сенсора 75mm, (b) С другой стороны 75mm

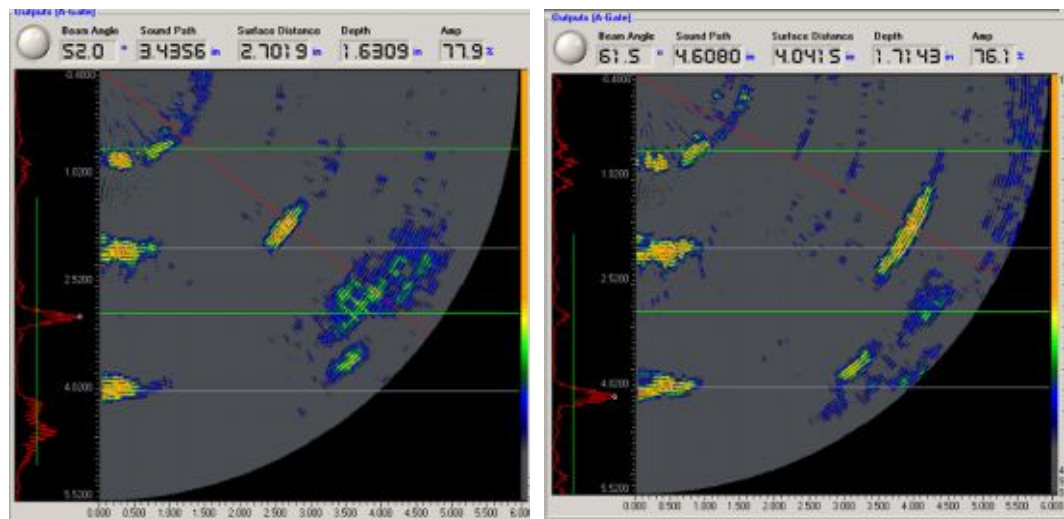


Рис. 9: Сектор скан от дефекта В, (а) Со стороны сенсора 50mm, (b) С другой стороны 100mm

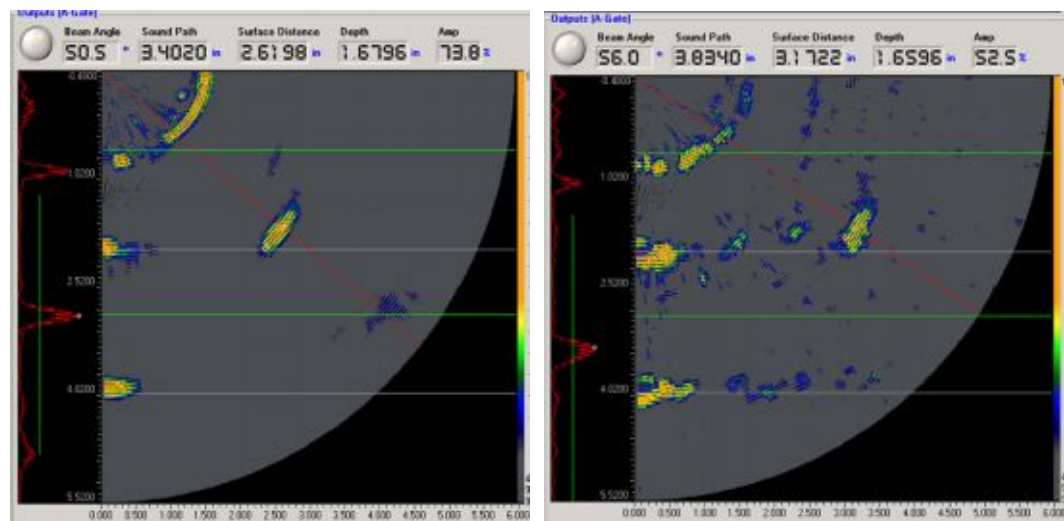


Рис.10: Сектор скан от дефекта С, (а) Со стороны сенсора 50mm, (b) С другой стороны 75mm

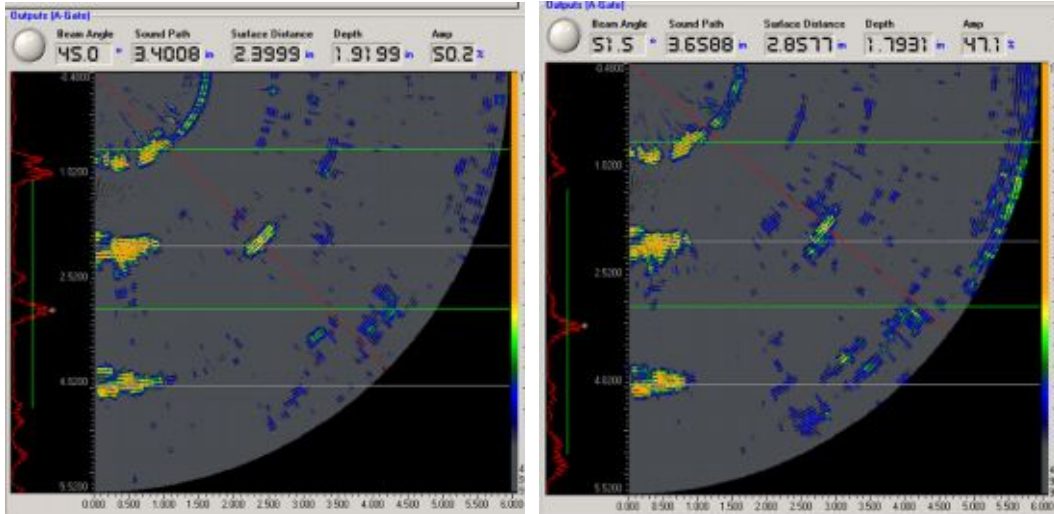


Рис. 11: Сектор скан от дефекта D: (a) Со стороны сенсора 50mm, (b) С другой стороны 100mm

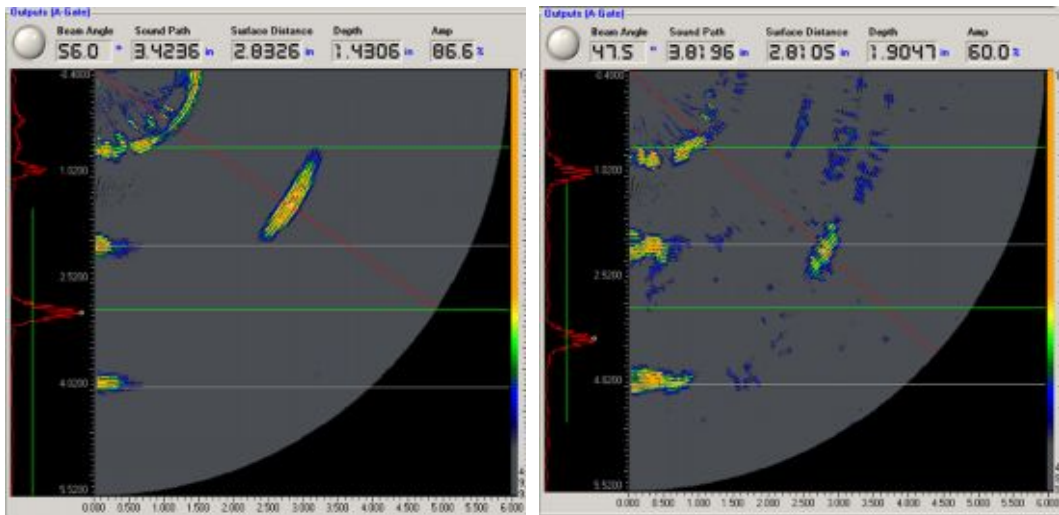


Рис. 12: Сектор скан от дефекта E: (a) Со стороны сенсора 50mm, (b) С другой стороны 75mm

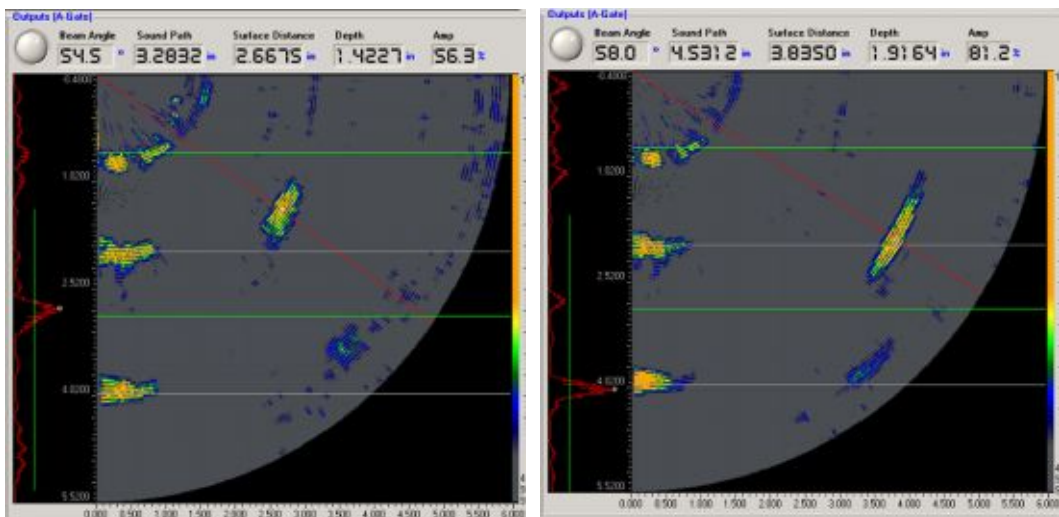


Рис. 13: Сектор скан от дефекта F: (a) Со стороны сенсора 50mm, (b) С другой стороны 75mm

4. Практика

Система тестировалась на различных образцах, которые используются в атомной промышленности. Система продемонстрировала возможность определения всех искусственных дефектов в представленных образцах с превосходным соотношением сигнал-шум по сравнению с традиционным, контактным контролем. Картинка внизу показывает тестируемые образцы, которые имеют как обычные сварные соединения из нержавеющей стали, так и соединения, выполненные из различных металлов. Результаты, полученные на этих образцах, являются частной собственностью, и не могут быть представлены в данном отчёте.

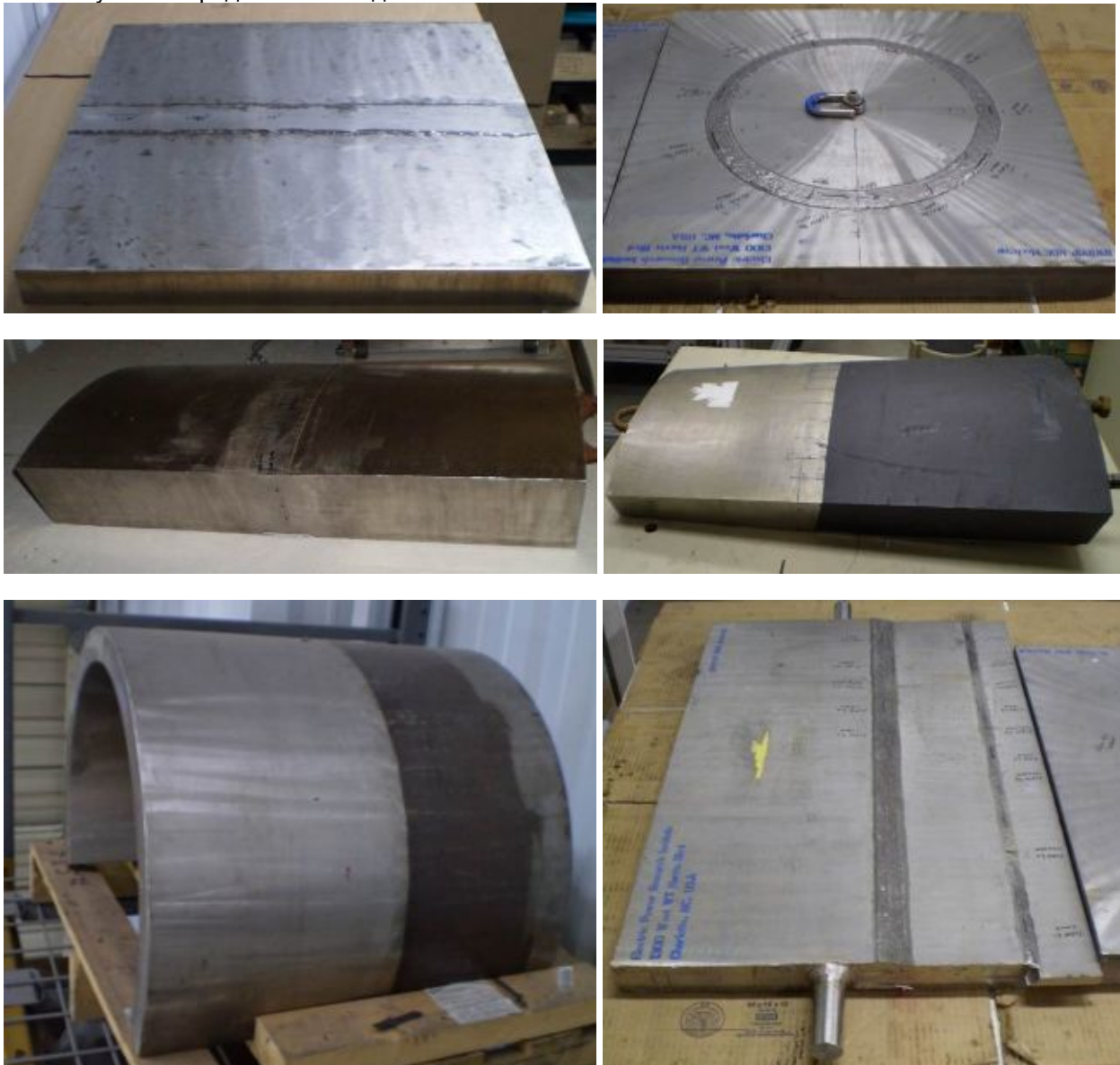


Рис. 14: Образцы, протестированные системой на ЭМАП с фазированной решеткой



5. Заключение

В данном документе отражены последние разработки в технологии с применением ЭМАП для контроля толстостенных аустенитных швов. Используя 8-ми канальный электронный блок высокой мощности, и новейший сенсор типа тандем на базе фазированной решетки для ПГ волны, мы имеем возможность определять дефекты в образцах с аустенитными швами с обеих сторон шва с великолепным соотношением сигнал-шум. Детально представлены результаты, полученные на образце толщиной 50mm.

В добавление к указанной возможности, данная методика с применением ЭМАП предоставляет возможность контроля под углами в диапазоне от 0° до 90°, что предоставляет абсолютно новые преимущества не доступные при традиционном, контактном УЗК. Используя эту систему, мы можем проводить контроль основного материала прямым лучом, контроль наклонным лучом ЗТВ и зоны аустенитного шва и контроль ЗТВ с обратной стороны шва, все это одновременно и за один проход.

Последующие работы будут направлены на изменение размеров оборудования, разработку оборудования для работы при высоких температурах и для работы с объектами, погруженными под воду.

Литература.

1. J. Huggell and B.S. Gray, "The ultrasonic inspection of austenitic materials-state of the art report", 1985.
2. M.G. Silk, "A computer model for ultrasonic propagation in complex orthotropic structures", Ultrasonics, 19, 208-212, (1981)
3. Thompson, R.B. in Physical Acoustics, Vol. 19. Edited by Thurston R.N. and Pierce A.D., Academic Press, New York, 1990, 157-200.
4. M. Hirao and H. Ogi, "EMATs for Science and industry-NonContacting Ultrasonic Ultrasonic Measurements", Kluwer Academic Publishers, 2003.
5. Huidong Gao, Syed Ali, Borja Lopez, "Efficient detection of delamination in multilayered structures using ultrasonic guided wave EMATs", NDT&E Int (2010), doi:10.1016/j.ndteint.2010.03.004,
6. Huidong Gao, Syed Ali, and Borja Lopez, "Inspection of Austenitic Weld with EMATs", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 29B, 1175-1181, (2010).
7. G. Hubschen, H.J. Salzburger, M. Kroning, et.al, "Results and experiences of ISI of Austenitic and dissimilar welds using SH-waves and EMUS-Probes", Elsevier Science Publishers, K. Kussmaul, Editor, 1993.
8. Ludwig von Bernus, Werner Rathgeb, Rudi Schmid, Friedrich Mohr, 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, 539-550, (1994).
9. Huidong Gao and Borja Lopez, "Development of Single Channel and Phased Array Electromagnetic Acoustic Transducer for Austenitic Weld Inspection", Materials Evaluation, Vol.68. (7), 821-827, 2010.
10. Noel Dube, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, RDTech, 2004