

К. В. ЗОТОВ**В. П. ЛУНИН**, *д-р техн. наук, проф.*

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО МЕТОДА ПОЛНОГО ФОКУСИРОВАНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация. Рассмотрены вопросы применения адаптивного метода полного фокусирования (Adaptive Total Focusing Method, A-TFM) для ультразвукового неразрушающего контроля сварных соединений. Показано, что традиционный метод TFM, обеспечивающий теоретически предельное разрешение за счёт синтетической фокусировки в каждой точке области визуализации, имеет существенные ограничения при контроле сварных швов, обусловленные сложной геометрией, анизотропией и структурными неоднородностями материалов. Адаптивный TFM, в отличие от классического подхода, реализует динамическое взвешивание вкладов отдельных пар «излучатель-приёмник» на основе критериев качества сигнала, что позволяет эффективно подавлять структурные шумы, компенсировать геометрические искажения и повышать достоверность выявления дефектов. Представлены основные адаптивные стратегии, включая SNR-взвешивание, оптимизацию на основе фактора когерентности и F-числа, а также приведены примеры практической реализации метода для различных типов сварных соединений.

Ключевые слова: адаптивный метод полного фокусирования, ультразвуковой контроль, сварные соединения, полнозахватная матрица, структурный шум, неразрушающий контроль.

Введение

Ультразвуковой контроль является одним из наиболее эффективных методов объёмной дефектоскопии сварных соединений, позволяющих выявлять такие плоскостные несплошности, как непровар, отсутствие сплавления по разделке шва и трещины. С развитием метода фазированных решёток и методов цифровой обработки сигналов особое место в практике неразрушающего контроля занял метод полного фокусирования (Total Focusing Method, TFM), реализуемый на основе полнозахватной матрицы (Full Matrix Capture, FMC).

Принцип TFM заключается в синтетической фокусировке в каждой точке области визуализации с использованием сигналов от всех возможных пар «излучатель-приёмник»

$$TFM(x, z) = \sum_i \sum_j s_{ij}(t_{ij}(x, z))$$

где S_{ij} — сигнал от излучателя i к приёмнику j , а t_{ij} — время распространения ультразвуковой волны до точки (x, z) .

Несмотря на высокое разрешение и качество изображений, классический TFM имеет ряд ограничений, критичных при контроле сварных соединений:

- высокая вычислительная нагрузка при обработке всех возможных комбинаций элементов;

- усиление шумов за счёт суммирования неинформативных или зашумлённых пар;
- генерация артефактов от преобразованных волн и структурных шумов;
- чувствительность к неопределённости акустических свойств материала.

Адаптивный метод полного фокусирования (А-TFM) представляет собой эволюционное развитие TFM, вносящее «интеллектуальную составляющую» в процесс формирования изображения. Вместо простого суммирования всех пар «излучатель-приёмник» А-TFM динамически выбирает или взвешивает вклады каждой пары на основе критериев качества сигнала, что особенно актуально для сварных соединений со сложной геометрией и неоднородной структурой.

Особенности ультразвукового контроля сварных соединений

Контроль сварных соединений представляет собой одну из наиболее сложных задач ультразвуковой дефектоскопии по ряду причин:

«Геометрические факторы» Сварные швы характеризуются сложным профилем поверхности — наличие усиления шва создаёт значительные трудности при акустическом контакте и вносит искажения в распространение ультразвуковых волн. При контроле трубопроводов часто возникают ситуации, когда доступ к сварному соединению возможен только с одной стороны (например, для врезок, Y-образных соединений или сварных швов арматуры), что существенно снижает надёжность выявления дефектов на дальней стенке.

«Структурная неоднородность» Аустенитные нержавеющие стали, широко применяемые в энергетике и нефтехимии, характеризуются крупнозернистой структурой и микроструктурной неоднородностью, что приводит к генерации значительного структурного шума при ультразвуковом контроле. Это явление снижает отношение сигнал-шум и размывает контуры дефектов на изображениях, полученных классическим методом TFM.

«Анизотропия свойств» Сварные швы, особенно в разнородных металлах, могут обладать анизотропными упругими свойствами, что затрудняет точный расчёт времён распространения и приводит к искажению изображений.

Требования к методу контроля. Для эффективного контроля сварных соединений нужно обеспечивать:

- высокое пространственное разрешение для выявления мелких дефектов;
- подавление структурных шумов для крупнозернистых материалов;
- возможность адаптации к переменной геометрии поверхности;
- устойчивость к неопределённости акустических параметров материала;
- надёжное выявление дефектов при одностороннем доступе.

Именно эти требования делают адаптивный TFM особенно перспективным для контроля сварных соединений.

Адаптивный TFM: принципы и алгоритмы. Общая концепция. Адаптивный TFM можно представить как модификацию классического TFM с введением весовых коэффициентов, зависящих от качества сигнала в каждой точке фокусировки:

$$A\text{-TFM}(x, z) = \sum_i \sum_j w_{ij}(x, z) \cdot s_{ij}(t_{ij}(x, z))$$

где $W_{ij}(x, z)$ — адаптивный вес для пары «излучатель i — приёмник j » в точке (x, z) . Ключевое новшество заключается в том, что веса вычисляются на основе данных, полученных в процессе конкретного контроля, а не задаются априорно.

Можно выделить следующие основные адаптивные стратегии.

SNR-взвешивание. Данная стратегия основана на том, что каждой паре «излучатель-приёмник» присваивается вес, пропорциональный отношению сигнал-шум (SNR) в окрестности фокальной точки

$$w_{ij}(x, z) = f(SNR_{ij}(x, z))$$

Вклады с низким SNR подавляются, тогда как сигналы с высоким SNR доминируют при суммировании. Это позволяет эффективно фильтровать шумовые составляющие, что особенно важно при контроле крупнозернистых материалов.

Оптимизация на основе фактора когерентности. Анализ фазовой согласованности принятых сигналов позволяет идентифицировать когерентные сигналы на приёмнике, соответствующие реальным отражателям:

$$CF(x, z) = \frac{|\sum s_{ij}|^2}{N \sum |s_{ij}|^2}$$

Низкая когерентность указывает на рассеяние или шум, что инициирует адаптивное подавление таких сигналов. Методы фазовой когерентной визуализации (Phase Coherence Imaging, PCI) особенно эффективны для подавления структурного шума в аустенитных сварных швах.

Адаптация F-числа. Одним из эффективных подходов для подавления структурного шума является адаптивная оптимизация на основе динамического F-числа, определяемого как отношение глубины визуализации к эффективной ширине апертуры. Алгоритм динамически регулирует эффективную апертуру для каждой синтезируемой точки:

- для ближней зоны или требований высокого разрешения в областях автоматически используется меньшее F-число для учета большего числа сигналов элементов и обеспечения оптимального латерального разрешения;
- для глубоких точек или областей, чувствительных к шуму, F-число увеличивается, что приводит к прогрессивному сужению эффективной синтетической апертуры и активной фильтрации сигналов краевых элементов с большими углами падения, склонных к шуму зернограницного рассеяния.

Экспериментальные результаты показывают, что по сравнению с классическим TFM данный подход увеличивает отношение сигнал-шум на 4%, снижает индекс эффективности решётки на 8,9% и сокращает время визуализации на 36,5%.

Машинное обучение. В более сложных реализациях для прогнозирования оптимальных весовых коэффициентов могут применяться методы машинного обучения. На этапе обучения нейросетевая модель распознаёт характерные паттерны дефектов и соответствующие им оптимальные весовые схемы, после

чего в режиме реального времени предсказывает веса для каждой фокальной точки.

Компенсация геометрических неоднородностей. Важнейшим аспектом применения А-TFM к сварным соединениям является способность метода компенсировать нерегулярности геометрии поверхности. Адаптивный подход позволяет в два этапа определить профиль поверхности компонента и профиль дальней стенки, что даёт возможность измерять остаточную толщину в любой позиции под сварным швом и вблизи.

При контроле трубопроводов сварные швы часто имеют нерегулярный профиль, и традиционные методы не обеспечивают надёжного акустического контакта. Адаптивная обработка данных FMC позволяет определить внешнюю поверхность трубы и скорректировать фокальные законы в соответствии с реальной геометрией. Используя скорректированные фокальные законы, становится возможным определить профиль внутренней поверхности и формировать изображения не только напрямую через внешнюю поверхность, но и на основе отражений от внутренней и внешней стенок.

Применение А-TFM для различных типов сварных соединений

Контроль сварных швов трубопроводов. Первоначальные подходы использовали ультразвуковые решётки на пластиковых призмах, размещаемых с обеих сторон продольного шва. Однако в зависимости от качества изготовления не всегда удавалось обеспечить хороший акустический контакт между поверхностью основного металла трубы и призмами, что сказывалось на качестве и достоверности контроля. Альтернативный подход с использованием локальной иммерсионной ванны и адаптивной обработки данных FMC позволил существенно повысить надёжность контроля. Комбинирование изображений, полученных по различным схемам, в единое поперечное сечение обеспечивает эффективную оценку дефектов в зоне сварного соединения и окружающей зоне.

Контроль при одностороннем доступе. Для многих объектов трубопроводного транспорта, таких как врезки, Y-образные соединения и сварные швы арматуры, доступ возможен только с одной стороны сварного соединения. При ультразвуковом контроле таких соединений надёжность выявления дефектов на дальней кромке разделки сварного соединения существенно снижается.

Применение адаптивного TFM с использованием сканирования по поверхности сварного валика позволяет визуализировать геометрические изменения, связанные с внешней формой шва. Сравнение результатов А-TFM с результатами контроля фазированными решётками (PAUT), выполненного в соответствии с требованиями ISO, подтверждает эффективность адаптивного подхода для контроля соединений с односторонним доступом.

Преимущества А-TFM перед классическим TFM. Адаптивный TFM обеспечивает ряд существенных преимуществ при контроле сварных соединений (Таблица 1).

Табл.1. Сравнение характеристик классического и адаптивного методов

Характеристика	Классический TFM	Адаптивный TFM
Подавление структурного шума	Ограниченное	Эффективное (до +10 дБ SNR) ³
Точность позиционирования дефектов	Зависит от качества данных	< 1 мм для диаметра 2 мм ³
Адаптация к геометрии поверхности	Отсутствует	Полная ⁷
Время обработки	Базовое	Сокращение до 36,5% ¹¹
Устойчивость к анизотропии	Низкая	Высокая ³

Практические результаты. Экспериментальные исследования подтверждают высокую эффективность адаптивного TFM:

- при контроле анизотропных стале с неизвестными свойствами достигнуто повышение отношения сигнал-шум на 10 дБ;
- для V-образных сварных швов обеспечено позиционирование дефектов с погрешностью менее 1 мм;
- для аустенитных сварных швов достигнуто снижение времени визуализации на 36,5%;
- для сварных швов с нерегулярным профилем обеспечено измерение остаточной толщины в любой позиции.

Нормативная база. Применение методов TFM и A-TFM для контроля сварных соединений регламентируется рядом международных стандартов. В частности, ISO 23864:2021 [10] устанавливает требования к применению FMC/TFM для ультразвукового контроля сварных соединений металлических материалов минимальной толщиной 3,2 мм. ISO 23865:2021 регламентирует общее применение технологии FMC/TFM и аналогичных технологий.

Заключение

Адаптивный метод полного фокусирования представляет собой значительный шаг вперёд в области ультразвукового контроля сварных соединений. В отличие от классического TFM, использующего фиксированный алгоритм обработки всех пар «излучатель-приёмник», A-TFM реализует интеллектуальное взвешивание вкладов на основе критериев качества сигнала, что позволяет: эффективно подавлять структурные шумы, характерные для крупнозернистых аустенитных стале, за счёт динамического регулирования апертуры и использования фазовой когерентности; компенсировать геометрические неоднородности поверхности сварных швов, обеспечивая надёжную визуализацию даже при нерегулярном профиле валика;

адаптироваться к анизотропным свойствам материалов, что критически важно для контроля V-образных сварных швов и плакированных компонентов; обеспечивать высокую точность позиционирования дефектов при одностороннем доступе к сварному соединению; сокращать время обработки данных, что повышает практическую применимость метода в промышленных условиях.

Разработка методик контроля сварных соединений с неудалённым усилением шва с использованием А-TFM открывает перспективы для замены радиографического контроля ультразвуковым в более широком круге применений, что обеспечивает повышение безопасности, снижение затрат и сокращение времени простоев оборудования.

Дальнейшее развитие адаптивных методов будет связано с интеграцией технологий машинного обучения для прогнозирования оптимальных весовых схем, созданием специализированных программно-аппаратных комплексов для реального времени и расширением нормативной базы. Адаптивный TFM представляет собой не просто эволюцию существующего метода, а смену парадигмы — переход от унифицированной обработки к интеллектуальному, контекстно-зависимому анализу, что определяет будущее развитие ультразвукового неразрушающего контроля сварных соединений.

Список литературы

1. J. Camacho, J. Cruza, J. Brizuela, and C. Fritsch, *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, IEEE Transactions on 61, 673–684 (2014).
2. Application of Adaptive-TFM Technique to Inspection of One-side Accessible Welds, *KCI* (2025).
3. Adaptive TFM imaging for thickness meas. on pipe welds, *BINDT* (2018).
4. Adaptive ultrasonic imaging of electric resistance welded pipeline seams, *ECNDT* (2018).
5. Adaptive ultrasonic method for imaging in anisotropic steels, *HAL* (2021).
6. F-number adaptive full-focus optimization algorithm for suppressing grain noise, *Nondestructive Testing*, 2026, 48(3): 32-37.
7. Improvement of Ultrasonic Imaging Tools on Portable Instruments, *NDT.net*.
8. UT in lieu of RT: Guidance and Validation of Through Cap Inspection of Welds with Intact Caps, *TWI* (2025).
9. Robotic Laser Beam Reduced Pressure Welding, *TWI* (2025).
10. ISO 23864:2021. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль. Использование автоматизированной технологии общей фокусировки (TFM) и аналогичных технологий.

Контакты:

ZotovKonV@mpei.ru (Зотов Константин Владимирович)

LuninVP@mpei.ru (Лунин Валерий Павлович)