

ПРОБЛЕМЫ ИЗНОСА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК



ПЕПЕЛЯЕВ Андрей Валентинович
ООО «ТЕХКОН», Москва

Проблема износа рабочей поверхности пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) хорошо известна в практике УЗК. И это понятно – например, при сканировании сварного шва протяженностью 1 м по поперечно-продольной схеме пробег ПЭП достигает 100 м и более.

ПЭП может оставаться работоспособным, пока его акустическая задержка (призма) не износится до пьезопластины. Но по мере износа меняются некоторые характеристики ПЭП, которые существенно влияют на результаты контроля. Это одна из причин, по которой нужно с установленной периодичностью определять точку выхода, стрелу, угол ввода ПЭП, настройку глубиномера, чувствительность и другие параметры в соответствии с документацией на контроль.

При настройке дефектоскопа следует применять не номинальные характеристики ПЭП, указанные, например, на его корпусе, а действительные, определенные по калибровочным и настроечным образцам. Проверка соответствующих характеристик ПЭП проводится, как правило, не реже одного раза за смену перед началом контроля, чувствительность контроля и точность глубиномера должны проверяться чаще.

Перечислены проблемы, связанные с износом ультразвуковых преобразователей, приведены способы защиты преобразователей от износа и компенсации его влияния на результаты контроля. Рассмотрена полезная функция дефектоскопа с преобразователями – фазированными решетками (ПФР) по определению профиля рабочей поверхности призм. Показано, как эта функция позволяет использовать для расчета законов фокусировки и определения координат отражателей не номинальные, а действительные параметры изношенной призмы, что повышает достоверность результатов контроля. Одновременно рассмотрены некоторые практические вопросы по технологии проведения УЗК с ПФР.

Но даже такие строгие меры не решают всех проблем изношенных призм. Например, увеличение стрелы ПЭП может снизить контроледоступность корневой части сварного шва, а увеличение угла ввода может привести к возбуждению поверхностной волны и появлению сигналов-помех от нее. В подобных случаях требуется замена изношенных ПЭП.

В настоящее время есть достаточно большой выбор ПЭП со сменными или износостойкими призмами.

С применением дорогостоящих многоэлементных ПФР проблема износа стала еще более актуальной. Это справедливо даже при том, что ПФР заменяет некоторые виды механического сканирования электронным, например позволяет избавиться от поперечных перемещений при контроле сварных швов, что намного сокращает пробег ПФР.

Первый способ защиты от износа, применимый и к обычным ПЭП: большинство моделей ПФР используют со сменными призмами. Они не только защищают ПФР, но и делают их более универсальными, что позволяет с одной ПФР решать разнообразные задачи УЗК.

Теоретически с помощью одной ПФР можно вводить в объект контроля (ОК) ультразвуковые волны разных типов под различными углами в соответствии с законами преломления и трансформации волн. Но чтобы обеспечить приемлемую чувствительность и отношение амплитуды полезного сигнала к уровню шумов и помех, лучше применять призмы для заданного типа волн с определенным базовым углом ввода. Далее можно, например, в режиме секторного сканирования качать луч в ОК относительно базового угла ввода, обычно в диапазоне $\pm 15...20^\circ$.

Таким образом, сменная призма, кроме защиты ПФР, обеспечивает ввод разных типов ультразвуковых волн с заданными характеристиками в ОК, а также создает акустический контакт и позволяет установить ПФР в держатели сканеров.

С одной ПФР можно применять призмы нескольких типов: прямые разной высоты, наклонные на продольные волны, наклонные на поперечные волны, с различным базовым углом ввода, а также притертые под разные диаметры и с различными параметрами фокусировки. В некоторых случаях применяют ПФР без призмы, но для этого на ее рабочую поверхность нужно наклеить тонкий протектор. В качестве такого протектора в простейших случаях подойдет обычная изолянта.

Для защиты самих призм используют специальные износостойкие вставки, например, из карбида вольфрама, которые устанавливаются в призме или крепятся к ней снаружи. При контроле эти же вставки создают щелевой акустический контакт с зазором между призмой и поверхностью ОК примерно 0,2 мм, что достигается регулировкой вставок по высоте. Конкретные значения зазора при щелевом контакте зависят от различных

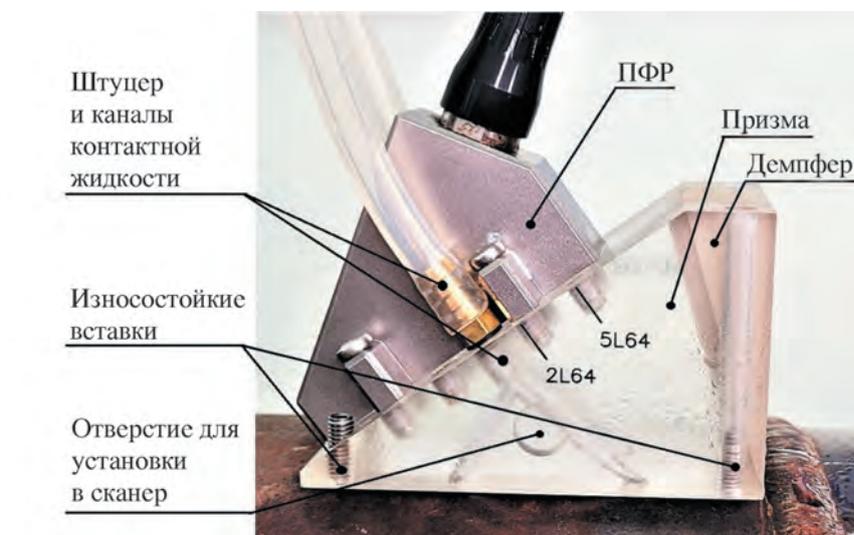


Рис. 1. ПФР со сменной призмой для АУЗК и МУЗК

факторов, включая состояние поверхности сканирования ОК и характеристики применяемых средств контроля. В указанный зазор по специальным каналам, также находящимся в призме, подается под давлением контактная жидкость. Кроме того, защитные вставки фиксируют призму на цилиндрической поверхности ОК.

ПФР с подобной сменной призмой показан на рис. 1. В качестве примера взята модель SA2-N55S-ИНС, изготовленная из рексолита, с базовым углом ввода 55° для поперечных волн в стали, со встроенными износостойкими вставками регулируемой высоты, каналами для подачи контактной жидкости и отверстиями для установки в сканеры различных моделей. На такие призмы устанавливаются 64-элементные ПФР с апертурой до 48×12 мм и рабочей частотой от 2,25 до 10 МГц. ПФР с такими призмами или их аналоги чаще применяют в системах автоматизированного и механизированного УЗК (АУЗК и МУЗК) на базе дефектоскопов OmniScan и некоторых других. В более простых случаях вместо сканера к призме можно прикрепить миниатюрный датчик

пути ENC1 (Mini-Wheel) или его аналоги.

Как пример универсальности на рис. 2 показан тот же ПФР, но установленный на призму для продольных волн SA2-N60L-ИНС. Эта призма имеет те же конструктивные элементы, что и показанная на рис. 1, но ее базовый угол ввода составляет 60° для продольных волн в стали. Наклонный ввод продольных волн вместо поперечных применяют при УЗК сварных швов нержавеющей сталей, чтобы уменьшить уровень структурных шумов.

Чтобы еще расширить область применения, тот же ПФР можно установить на прямую призму и проводить УЗК основного металла, композитов и полимеров, а также толщинометрию.

Решения, которые хорошо показали себя для АУЗК и МУЗК, не всегда подходят для ручного УЗК (РУЗК). Одна из причин – РУЗК обычно выполняет один человек, а не бригада из нескольких. Кроме того, РУЗК часто проводят на большом числе контрольных участков с разной толщиной и диаметром ОК, удаленных друг от друга, а также с ограниченным доступом. Иначе говоря, РУЗК выполняют на тех объектах, где

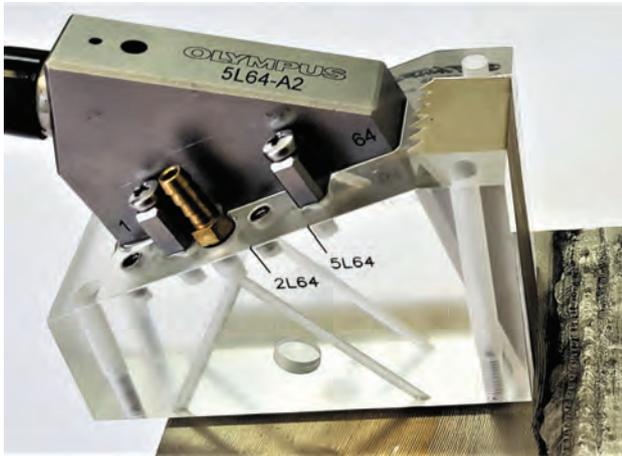


Рис. 2. ПФР со сменной призмой для УЗК нержавеющей стали

невозможно или неэффективно по разным причинам проведение АУЗК и МУЗК.

В частности, для объектов РУЗК бывает сложно применить сканеры, а также обеспечить акустический контакт щелевым способом. Для такого типа контакта нужно использовать резервуар с помпой для подачи контактной жидкости или постоянно наносить вязкую контактную жидкость на поверхность ОК толстым слоем, что неудобно и отнимает много времени. Поэтому при РУЗК часто применяют ПФР со сменными призмами, но без защитных вставок, с контактным способом ввода ультразвука. В результате такие призмы постепенно изнашиваются.

Пример изношенной призмы показан на рис. 3. Рядом для сравнения находится новая призма той же модели. Это призма популярной модели SA10-N55S, изготовленная из рексолита, с базовым углом ввода 55° для поперечных волн в стали. Такие призмы или их аналоги применяют с 16- или 32-элементными ПФР, имеющими апертуру до 10×10 мм и рабочую частоту от 2,25 до 10 МГц. При необходимости на призмы данной модели устанавливают специальную рамку с износостойкими вставками, каналами для подачи контактной жидкости и отверстиями для закрепления в сканере (модификация ИНС).

Призма имеет небольшие габаритные размеры ($D \times Ш \times В$) $23 \times 23 \times 14$ мм без износостойких вставок, поэтому ее удобно использовать при РУЗК. Но возможно применение данных призм и при МУЗК. Для этого в простейшем случае к призме крепится миниатюрный датчик пути ENC1 (Mini-Wheel) или его аналоги.

Как видно на рис. 3, в изношенной призме от втулки для крепления ПФР до боковой поверхности образовалась характерная трещина. Эта трещина не перекрывает ход лучей, втулка остается закрепленной в призме, поэтому призму пока можно применять. Но при таком дефекте втулка может в любой момент выпасть, поэтому в подобных случаях всегда надо иметь наготове запасную призму.

Чтобы понять, как можно учесть износ призмы при настройке дефектоскопа, рассмотрим способ задания параметров призмы ПФР. Данный способ применяют при моделировании хода лучей и расчете законов фокусировки в дефектоскопе Omni-Scan и некоторых других. Для линейного ПФР задают скорость продольных ультразвуковых волн в призме c_W (для рексолита 2330 м/с при 20°C , подробнее см. работу [1]), угол призмы β , расстояние от центра первого элемента ПФР до передней грани призмы X_1 и высоту призмы под центром первого элемента H_1 , как это показано на рис. 4. При известном шаге ПФР параметры призмы для остальных элементов ПФР вычисляются автоматически.

В результате износа значения β и H_1 изменяются на β' и H_1' . Практика показывает, что в большинстве случаев при РУЗК наклонные призмы как ПФР, так и обычных ПЭП изнашиваются сильнее к задней грани призмы, т.е. при износе угол призмы обычно увеличивается от номинального β до действительного β' (см. рис. 4). Это связано с тем, что при ручном сканировании заднюю часть призмы обычно сильнее прижимают к поверхности ОК, чем переднюю. Именно такой характер износа имеет призма, показанная на рис. 3.

Если не предпринять дополнительных мер, то при расчете законов фокусировки в дефектоскопе будут использованы номинальные значения па-



Рис. 3. Изношенная и новая призма ПФР для РУЗК

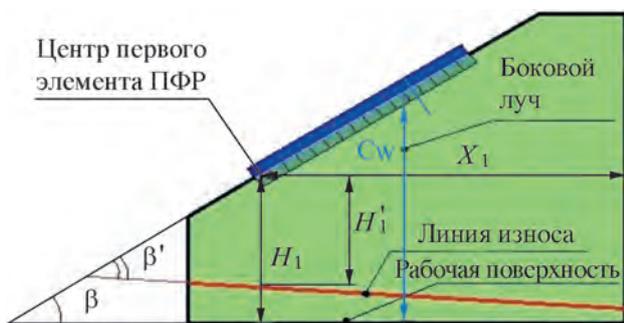


Рис. 4. Параметры призмы линейного ПФР

раметров призмы ПФР. Отклонение действительных значений от номинальных, вызванное износом призмы, приводит в первую очередь к росту погрешности при определении координат отражателей.

Практика показывает, что при незначительном износе приемлемая точность измерения координат достигается калибровкой задержки в призме. Калибровка задержки в призме, как и калибровка чувствительности, может проводиться для всех лучей электронного сканирования, генерируемых ПФР. Такая функция в том или ином виде есть во всех известных дефектоскопах с ПФР. Для калибровки задержки в призме чаще всего используют контрольный отражатель в виде вогнутой цилиндрической поверхности или бокового цилиндрического отверстия в калибровочных образцах.

При значительном износе призмы, особенно с изменением ее угла, калибровки задержки становится недостаточно. Поэтому в дефектоскопе OmniScan X3, начиная с версии программного обеспечения MXU 5.13, появилась новая функция – определение профиля контактной поверхности призмы.

Выполняется эта функция после выбора в базе данных дефектоскопа модели ПФР и призмы следующим образом. На призму устанавливают ПФР, рабочая поверхность призмы остается в воздухе, с

нее удаляют контактную жидкость. После входа в соответствующее меню автоматически включается режим линейного сканирования с апертурой в один элемент для всех элементов ПФР. Для наклонной призмы боковым лучом каждого элемента ПФР получают донный сигнал от рабочей поверхности (см. рис. 4, для примера показан боковой луч одного из элементов). Индикации указанных донных сигналов отображают профиль рабочей поверхности призмы, по ним определяется высота призмы под каждым элементом ПФР, включая H_1' , и, соответственно, угол призмы β' .

На рис. 5 приведен пример определения профиля и измерения параметров изношенной призмы ПФР SA10-N55S, которая показана на рис. 3. Отметим, что в результате износа угол призмы увеличился от номинального значения $\beta = 36,1$ до значения $\beta' = 38,6^\circ$, что привело к изменению базового угла ввода призмы для поперечных волн в стали с 55 до 60° (при расчете угла ввода по закону синусов).

Далее при расчете законов фокусировки, возбуждении и приеме сигналов в соответствии с этими законами, а также при определении координат отражателей можно использовать не номинальные, а измеренные параметры призмы, для этого нужно нажать кнопку дисплейного интерфейса «Принять профиль». Для отмены корректировки параметров призмы нажимается кнопка «Переустановить номинал».

Для демонстрации работы данной функции был проведен простой эксперимент. На изношенную призму SA10-N55S, показанную на рис. 3, установили 16-элементный ПФР с рабочей частотой 2,25 МГц, для эхометода включили режим секторного сканирования поперечным волнами в диапазоне от 40 до 70° , далее при среднем угле указанного сектора 55° определили координаты отражателя – отверстия $\varnothing 6$ мм на глубине 44 мм в калибровочном образце СО-2.

Без корректировки параметров изношенной призмы разница между измеренным и действи-

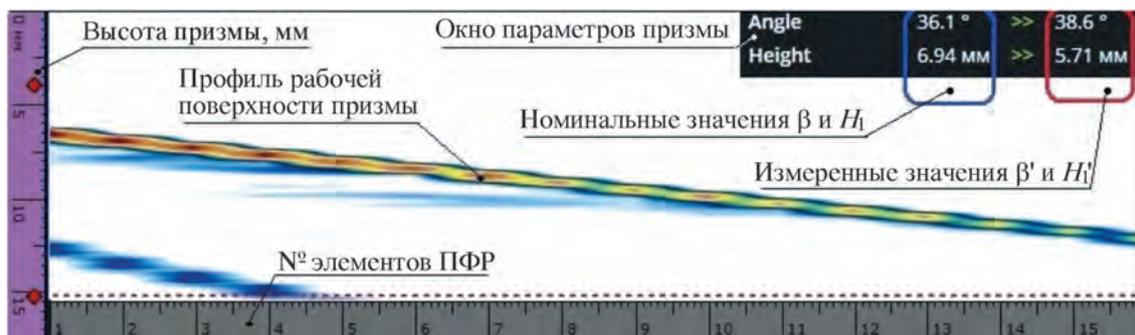


Рис. 5. Определение профиля и измерение параметров призмы ПФР

тельными значениями глубины залегания отражателя $y_{изм} - y_d$ составила 3,8 мм, такая же разница для проекционного расстояния (расстояние от передней грани призмы до проекции отражателя на поверхность ввода ультразвука) $x_{изм} - x_d$ составила -3,3 мм. После применения корректировки параметров призмы погрешность измерения указанных координат не превышала $\pm 0,5$ мм.

Определение точки выхода и угла ввода, выполненное по калибровочным образцам СО-3 и СО-2, показало, что без корректировки параметров призмы вместо луча с углом ввода 55° генерируется луч с углом ввода 59° . В результате при максимальной амплитуде эхосигнала от отражателя увеличивается расстояние до отражателя по лучу и ширина диаграммы направленности для соответствующей активной группы элементов ПФР. Это дополнительно снижает точность определения координат отражателя и соотношение полезный сигнал/шум.

После корректировки параметров призмы измеренный угол ввода стал соответствовать своему номинальному значению 55° , при этом амплитуда эхосигнала от отражателя увеличилась примерно на 3 дБ при том же уровне шумов.

Для угла ввода 70° после корректировки параметров призмы амплитуда эхосигнала от отражателя $\varnothing 6$ мм на глубине 15 мм в СО-2 увеличилась уже на 8 дБ по сравнению со значением до корректировки. Это еще раз показывает, что износ призм может сильнее влиять на результаты контроля именно при больших углах ввода.

Тут нужно учитывать следующую особенность ПФР. Формально при настройке многих моделей дефектоскопов можно увеличить угол ввода, например, до 89° . Но демпфер на передней грани наклонных призм (показан на рис. 1 и 3) частично или полностью ослабляет сигналы, которые вводятся в ОК под большими углами. С приемлемой потерей энергии в большинстве моделей призм распространяются только те сигналы, для которых угол ввода не превышает $70-75^\circ$. Некоторые средства моделирования хода лучей позволяют это учитывать, например программа Veam Tool, которая отображает ход лучей не только в ОК, но и в призме.

Использование ПФР с углами ввода больше чем $70-75^\circ$, возможно, но это реализуется без призм или с призмами специальных моделей.

Выше были рассмотрены примеры корректировки параметров изношенной призмы для эхометода. Для метода TFM/FMC в режиме ТТ (подробнее о данном методе и его режимах рассказано, например, в работе [2]) и отражателя $\varnothing 6$ мм на глубине 44 мм в СО-2 без корректировки параметров изношенной призмы разница $y_{изм} - y_d$ составила

2,3 мм, а разница $x_{изм} - x_d = -4,8$ мм. После корректировки параметров призмы погрешность измерения координат также не превысила $\pm 0,5$ мм.

Таким образом, функция автоматического определения профиля изношенной рабочей поверхности призм ПФР позволяет следующее:

- 1) применить при моделировании хода лучей и расчете законов фокусировки не номинальные, а фактические параметры призмы;
- 2) повысить точность определения координат отражателей;
- 3) улучшить соотношение полезный сигнал/шум.

Если в дефектоскопе нет такой автоматической функции, то аналогичную корректировку для изношенной призмы ПФР можно выполнить вручную. Один из способов следующий. Настроить ноль глубиномера для ПФР без призмы. Настроить скорость ультразвука в материале равной скорости продольных волн в призме. Установить ПФР на наклонную призму, но выбрать в настройках вариант его применения «без призм», чтобы обнулить задержку развертки. Далее включить режим линейного сканирования с апертурой один элемент, получить индикации эхосигналов от рабочей поверхности призмы для всех элементов ПФР, как это показано на рис. 5. После этого по указанным индикациям определить высоту призмы под центром первого элемента ПФР и рассчитать угол призмы. Затем внести в базу данных дефектоскопа маркировку изношенной призмы и ее параметры для дальнейшего применения.

Таким образом, есть различные и весьма действенные способы, которые можно использовать для борьбы с износом призм и его негативным влиянием на результаты УЗК. Призмы с сильным износом и другими значительными повреждениями, с учетом упомянутых выше проблем, рекомендуется менять на новые. Для этого должен быть создан запас применяемых призм. В противном случае дефектоскоп или вся система МУЗК или АУЗК могут оказаться негодными к применению.

В статье рассмотрено влияние геометрических параметров призмы на результаты контроля. Кроме этого, результаты могут существенно зависеть от скорости ультразвука в призме, которая изменяется с температурой. Подробнее данная тема изложена в работе [1].

Библиографический список

1. Пепеляев А.В. Влияние температуры на результаты ультразвукового контроля методом TFM // Территория NDT. 2022. № 2. С. 38–42.
2. Чи-Ханг Кван. Оптимизация выбора преобразователя для контроля методом TFM/FMC // Территория NDT. 2019. № 4. С. 36–43. ■