



NDT World, 2017, v. 20, no. 1, pp. 41-45

DOI: 10.12737/*****

Идентификация дефектов при ультразвуковом контроле сварных соединений с применением технологии фазированных решеток

Представлена современная реализация классического K_{\perp} -способа распознавания вида дефекта, фундаментально разработанного около 30 лет назад в НИИ мостов ЛИИЖТа. Новое решение основано на применении технологии фазированных решеток (ФР) с использованием типовых ФР-преобразователей и реализуется непосредственно во время проведения рутинного контроля, не прерывая процесс сканирования и обнаружения дефектов. Результаты измерений на одних и тех же моделях дефектов с применением классической и современной реализации K_{\perp} -способа качественно совпадают; результаты определения вида реальных дефектов сварных швов подтверждены последующими разрушающими испытаниями.

G. Passi¹, S. R. Tsomuk²

On-the-Fly Weld Defects Pattern Analysis whilst Performing S-Scan Material Coverage Using PA UT Modality

Introduction. Sometime it may occur that the dangerous defects do not return the echoes exceeding the threshold level and may not be rejected based on the echo-amplitude evaluation. On the other hand the shape of the inhomogeneity on the cross-sectional image obtained through S-scan coverage and the echo dynamic analysis may lead to suspecting a crack and rejecting the defect. To back or decline the suspect on-the-fly there is a number of approaches and implementations available; one of them has been presented in the article.

The method. The technique presented in the article utilizes the effect of diffraction occurring due to interaction of the shear wave with the inhomogeneity in the material followed by the mode conversion and evaluating both the shear wave echo and the diffracted (scattered) mode converted longitudinal (compression) wave signals returned to the probe (so called K_{\perp} technique). In 80th the K_{\perp} technique was developed fundamentally and its implementation was based on the use of the specially designed twin crystal angle beam probes, in which the first crystal is used for the regular shear wave pulse echo inspection and the second one – just for the receiving of the diffracted mode converted compression wave signals. The new state-of-the-art solution is based on the use of the regular PA probes utilizing the ability of Sonotron NDT's portable ultrasonic PA instruments ISONIC 3510, ISONIC 2010, and ISONIC 2009 to perform on-the-fly embedding of the additional focal laws into the running sequence used of the routine inspection and implementing them with the purpose of receiving and analysis of the complimentary mode converted longitudinal wave signals, which carry the additional data required for identifying the defect under evaluation.

The results. The comparison experiments were performed on the same reflectors with the use of conventional modality and the above said specially designed twin crystal angle beam probe and PA modality; the matching of the results has been demonstrated. The results obtained on the real defects were confirmed through macro-slicing.

Conclusion. The embodiment for the PA-based on-the-fly defect pattern analysis utilizing the classic K_{\perp} technique has been found practically useful and recommended to the users of Sonotron NDT's PA instruments.

Keywords: phased array ultrasonic testing (PA UT), defect pattern analysis, diffraction, mode conversion, on-the-fly dynamic control of focal laws.

Несмотря на интенсивное развитие средств УЗК, связанное, в первую очередь, с развитием электронного управления ультразвуковым лучом, автоматическим и полуавтомати-

ческим сканированием, регистрацией результатов контроля и визуализацией дефектов, идентификация (определение формы и размера) обнаруженных дефектов и принятие решения об их допу-

стимости или отбраковке по-прежнему остаётся функцией, непосредственно выполняемой оператором. Особо ответственным является принятие таких решений при контроле объектов

Светлой памяти А. К. Гурвича посвящается

Submitted 9.03.17

Accepted 16.03.17

ПАССИ
Гарри

Генеральный директор
и научный руководитель
фирмы Sonotron NDT,
Израиль. Доктор наук,
профессор, III уровень
по UT, ET, MPI, MIA, RT.



ЦОМУК
Сергей Роальдович

Генеральный директор
ООО «Фирма «ЗОНД»,
в. н. с. НИИ мостов,
Санкт-Петербург, к. т. н.,
III уровень по акустиче-
скому виду НК.



¹ Sonotron NDT, Rehovot, Israel; info@sonotronndt.com

² ZOND Company, Research Institute of Bridges and Nondestructive Testing, St. Petersburg, Russia; zond@ndt.sp.ru

в процессе эксплуатации, когда дефекты, ранее признанные допустимыми, могут развиваться, трансформируясь в потенциально опасные, не всегда отражая при этом эхо-сигналы с амплитудой, достаточной для отбраковки по превышению над пороговым (браковочным) уровнем. В то же время, например, изображение неоднородности в поперечном сечении объекта, полученное путём секторного сканирования (рис. 1), и анализ последовательности эхо-сигналов от дефекта для различных углов ввода на А-сканах, формирующих кадр, могут вызвать подозрение о наличии трещины. В таких случаях с целью подтверждения или снятия подозрения о наличии потенциально опасного дефекта (трещины) следует оперативно провести дополнительные измерения, результаты которых позволят оценить его форму с большей определённой, а аппаратура контроля должна обеспечить возможность выполнения данных измерений с минимальными затратами времени, по возможности не прерывая рутинный контроль. В настоящей статье освещён способ K_{ij} идентификации типа дефекта (объёмный/плоскостной), разработанный и доведённый до реальной

практической применимости в НИИ мостов ЛИИЖТа в 1980-е гг., а также показана его современная реализация при контроле сварных швов с применением технологии фазированных решеток (ФР).

История и основы способа K_{ij}

В конце 1970-х — начале 1980-х гг. было установлено, что дифракция волн на отражателях разной формы происходит по-разному, вследствие чего и амплитуды дифрагированных волн на объёмных (округлых) и плоскостных дефектах разнятся между собой, а потому возможно получить дополнительную информацию о форме и типе дефекта по сравнению с использованием лишь отражённых волн. Были разработаны и, в определённой степени, нашли практическое применение несколько технологий, базирующихся на такой постановке задачи. К ним, в частности, относится *дельта-метод*, когда одновременно анализируются эхо-сигнал поперечной волны, воспринимаемой наклонным преобразователем (ПЭП), работающим в режиме излучения-приёма, и сигнал продольной волны, возникающей в результате озвучивания дефекта поперечной волной и воспринимаемый прямым ПЭП, располагаемым над дефектом [1–3]. Будучи достаточно простым и показавшим высокую корреляцию измеряемых параметров названных сигналов с типом дефекта, дельта-метод, тем не менее, получил ограниченное распространение в связи со сложностью практической реализации, связанной с необходимостью использования двух преобразователей, разнесённых конструктивно, а также невозможностью практического использования на сварных швах с неудалённым валиком усиления.

Этих недостатков лишен *способ K_{ij}* , предложенный в 1985 г. [4] и основанный на доказанном эффекте переизлучения продольной волны, трансформированной на дефекте из поперечной, в сторону наклонного ПЭП, реализующего контроль эхо-методом, причём интенсивность такого переизлучения краями плоскостных дефектов существенно выше по сравнению с округлыми. Для возможности приёма продольной волны ПЭП оснащается дополнительным пьезоэлементом, обеспечивающим приём под углом, равным углу ввода поперечной волны (рис. 2). Идентификация дефекта (плоскостной/округлый) осуществляется путем измерения соотношения амплитуд импульса продольной волны (U_{ij}) и эхо-сигнала поперечной волны

(U_{tt}), определяющего так называемый коэффициент $K_{ij} = U_{ij} / U_{tt}$.

На рис 3а представлен вид кривых распределения значений K_{ij} для округлых и плоскостных отражателей, полученных в [5].

Согласно [5] при расположении ПЭП в позиции приёма максимального эхо-сигнала поперечной волны разница $\Delta K_{ij} = K_{ij}^{плоск} - K_{ij}^{окр}$ достигает 15–20 дБ.

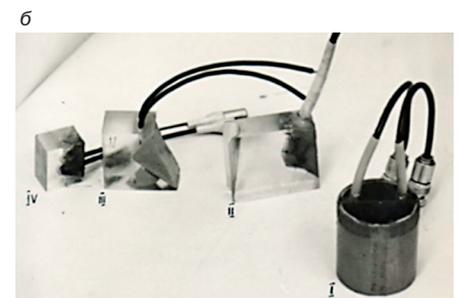
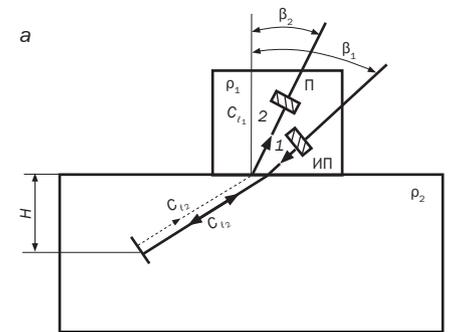


Рис. 2. ПЭП для реализации K_{ij} -способа: а — схема расположения пьезоэлементов и первый макет; б — эволюция конструкции: в результате серии экспериментов по её оптимизации создан окончательный вариант специализированного ПЭП с расположением пластин на двух соседних площадках призмы, ориентированных под углами $\beta_1 = 40^\circ$, $\beta_2 = 20^\circ$ и повернутых навстречу друг другу на угол 4° (на фото — внизу)

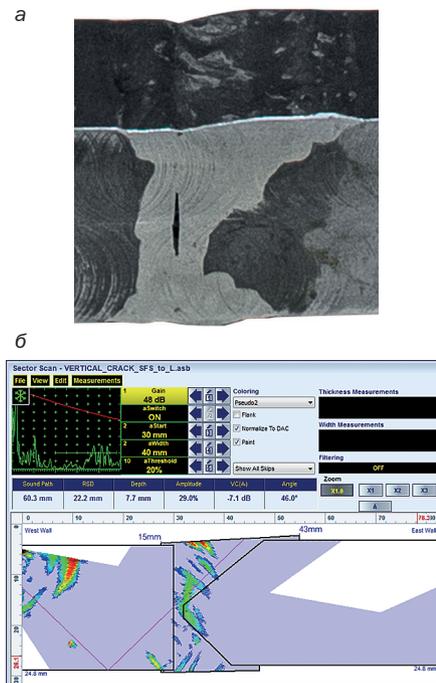


Рис. 1. Шлиф дефекта (вертикальная усталостная трещина), вырезанного из сварного шва на одной из электростанций в Японии (а) и индикация на экране ФР-дефектоскопа (б), полученная при контроле. Максимальная амплитуда эхо-сигнала более чем в два раза (7 дБ) ниже порогового уровня (кривая DAC), что не даёт оснований для немедленной отбраковки

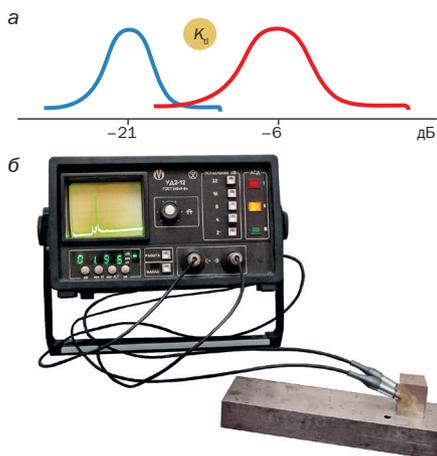


Рис. 3. Кривые распределения значений $K_{\text{ч}}$ для округлых (—) и плоскостных (—) отражателей (а) и определение ($K_{\text{ч}}^*$) эт. для двугранного угла в мере СО 2

Для уменьшения случайной составляющей погрешности и повышения воспроизводимости результатов в [5] предложено соотносить измеренную на дефекте величину ($K_{\text{ч}}^*$) с соответствующей величиной ($K_{\text{ч}}^*$) для эталонного отражателя, в качестве которого удобно использовать двугранный угол меры СО-2 (рис. 3б). Измерения на значительном числе моделей и реальных дефектов сварки, выполненные с использованием применяемых в прошлом аналоговых дефектоскопов с электронно-лучевой трубкой показали достаточно уверенное распознавание образа отражателя и подтвердили, что граничное значение ($K_{\text{ч}}^*$)_{гран.} идентификационного признака $K_{\text{ч}}^*$, где между классами «округлые» и «плоскостные» в таком случае составляет 8дБ.

Таким образом, в отличие от дельта-метода, способ $K_{\text{ч}}$ реализуется при использовании лишь одного ПЭП и не требует зачистки валика усиления сварного шва. Однако, несмотря на се-

рьезную теоретическую проработку и подтверждение её результатов экспериментами, способ $K_{\text{ч}}$ не нашёл широкого практического применения, что можно объяснить, в первую очередь, необходимостью выполнения ряда дополнительных операций по сравнению с обычным процессом контроля: также, как и при реализации дельта-метода, обнаружив дефект, необходимо зафиксировать ПЭП в положении приёма максимального эхо-сигнала, переключить дефектоскоп на работу в раздельном режиме и перенастроить его, получив дополнительный А-скан, распознать сигнал продольной волны и провести дополнительные измерения, после чего вернуться к первоначальной настройке и продолжать сканирование. При использовании аналоговой техники это занимало немало времени. Кроме того, требовалось модифицировать методики обычного эхо-импульсного контроля в связи с применением специализированных двухэлементных ПЭП.

Реализация способа $K_{\text{ч}}$ с применением технологии ФР

Реализация способа $K_{\text{ч}}$ с применением технологии ФР основана на **способности дефектоскопа выявлять и индексировать сигналы, соответствующие типу волны, выбранной оператором для измерений**. Тип волны выбирается путём задания её скорости в материале, наряду с которой также задают угол ввода и фокусное расстояние (вектор приёма). В соответствии с заданным набором параметров дефектоскоп реализует временные сдвиги (фазировку) для элементарных А-сканов, формируемых на каждом из элементов приёмной апертуры, предшествующую их суперпозиции с получением результирующего А-скана.

При этом угол призмы, на которой располагаются элементы решётки, не имеет особого значения, если дефектоскоп обладает достаточным диапазоном фазировки [6].

Первая реализация способа $K_{\text{ч}}$ с применением технологии ФР, основанная на работе прибора в режиме обычного дефектоскопа и использовании **типового ФР-преобразователя**, представлена несколько лет назад в [7] и иллюстрируется рис. 4. Однако такая реализация по-прежнему требует приостановить рутинный контроль каждый раз, когда требуется произвести идентификацию дефекта. Поэтому в феврале 2017 г. компания Sonotron NDT представила новое решение, позволяющее выполнять операции по идентификации типа дефекта непосредственно во время прозвучивания поперечного сечения материала [8]. Упомянутое решение иллюстрируется рис. 5, где вертикальная трещина, показанная на рис. 1, идентифицирована как потенциально опасный плоскостной дефект, что и послужило причиной изъятия из эксплуатации и последующего вскрытия сварного шва. Новое решение стало возможным, благодаря оснащению ФР-дефектоскопов серии ISONIC фирмы Sonotron NDT (ISONIC 2009, 2010, 3510) способностью модифицировать последовательность выполняемых для прозвучивания материала циклов излучения-приёма (фокальных законов) динамически, то есть, непосредственно в процессе их реализации: **получив индикацию неоднородности, подлежащей идентификации, оператор указывает точку на изображении, откуда предполагается принять дополнительный сигнал, касаясь её на экране прибора. Этим определяются вектор приёма и инициируется реализация дополнительно фокального**

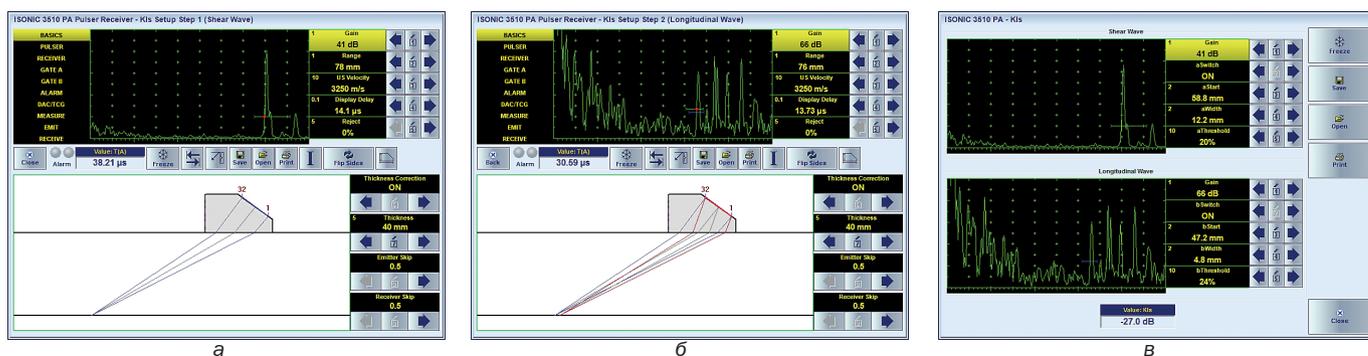


Рис. 4. Иллюстрация первой реализации способа $K_{\text{ч}}$ с применением технологии ФР на примере эхо-сигнала от бокового цилиндрического отверстия $\varnothing 1,2$ мм (компактный округлый отражатель) на глубине 30 мм: а — излучение и приём поперечной волны; б — излучение поперечной и приём продольной волны, дифрагированной на дефекте; в — последовательное исполнение циклов излучения-приема а и б в автоматическом режиме и измерение коэффициента $K_{\text{ч}}$

Примечание: в действительности $K_{\text{ч}} = K_{\text{ч}}$, однако компанией Sonotron NDT на начальном этапе принято решение не использовать оригинальное обозначение $K_{\text{ч}}$ до апробирования создателями классического способа в НИИ мостов. Динамическая иллюстрация живого экрана прибора доступна в интернете по ссылке: <https://www.youtube.com/watch?v=OnB68uimW3Y>

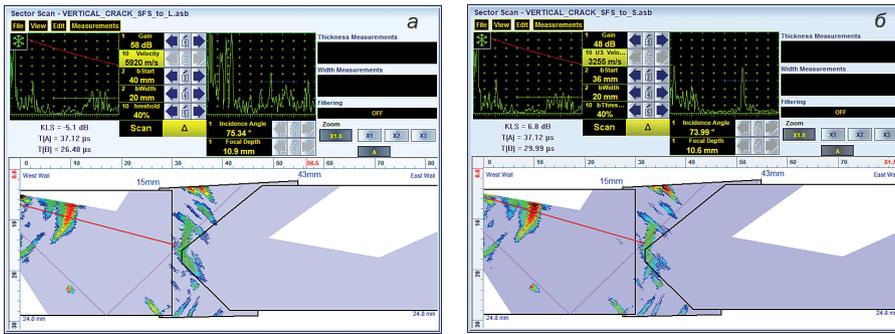


Рис. 5. Реализация K_{\perp} -способа (а) и эхо-зеркального метода (б) непосредственно во время прозвучивания материала при обнаружении вертикальной трещины, показанной на рис. 1. Для обоих скриншотов экрана ФР-дефектоскопа ISONIC 3510: синий курсор на изображении указывает ход луча в цикле излучения-приёма поперечной волны, выбранном из совокупности фокальных законов, выполняемых при реализации секторного сканирования, и соответствует озвучиванию неоднородности однократно отражённым лучом; соответствующий выбранному циклу А-скан слева отображает слабый эхо-сигнал поперечной волны; красный курсор отображает определённый оператором вектор приёма продольной (а) и поперечной (б) волны; измеренное значение $K_{\perp}(K_{\parallel})$ равно — 5,1 дБ (а), что характеризует дефект как плоскостной, а сильный сигнал поперечной волны (б) превышает изначально зафиксированный более чем в 2 раза (6,8 дБ), что дополнительно подтверждает идентификацию дефекта как плоскостного
Примечание: динамическая иллюстрация (видео) экрана прибора для данного примера доступна в интернете по ссылке: <https://www.youtube.com/watch?v=eKDKCaH5GvM>

закона, во время исполнения которого режим излучения остаётся неизменным (поперечная волна). Определив вектор приёма, оператор также задаёт тип волны, сигналы которой подлежат анализу: в случае выбора продольной волны прибор реализует способ K_{\parallel} . При подозрении на наличие вертикально ориентированного плоскостного дефекта полезно также получить дополнительный сигнал поперечной волны, реализуя эхо-зеркальный метод контроля тем же ФР-преобразователем (подобно схеме тандем) [2, 9].

Апробация в НИИ мостов

Для компании Sonotron NDT является большой честью то, что сотрудники НИИ мостов — оригинального разработчика способа K_{\perp} — нашли возможность провести апробацию нового решения на тех же образцах, на которых этот способ отработывался более 30 лет назад. В частности, в качестве моделей объёмного дефекта (далее — модель 1, рис. 6а) использовалось эллиптическое отверстие ($2b = 11$ мм), плоскостного (далее — модель 2, рис. 6б) — искусственный вертикальный отражатель размером $2b = 3,5$ мм. Необходимо отметить, что последний был выполнен методом сдавливания округлого отражателя, и в результате «плоскостность» на кромках (ребрах) получилась заметно выше, чем в центре отражателя. С целью оценки остроты верхней и нижней кромок модель 2 озвучивали с двух поверхностей образца, при этом глубина модели составляла 23 и 47 мм. Измерения выполнялись с помощью дефектоскопа ISONIC 2010 и ФР-преобразователя 104379W36 (линейная решётка, 5 МГц, 32 элемента, шаг решётки 0,5 мм, ширина элементов 10 мм, расположена на призме с углом 36°) в режиме секторного сканирования. Сначала измерения проводили в центре отражателя, затем, изменяя угол и фокус, — на верхней и нижней кромках отражателя. Результаты измерений, проиллюстрированные на рис. 7, свелись к следующему:

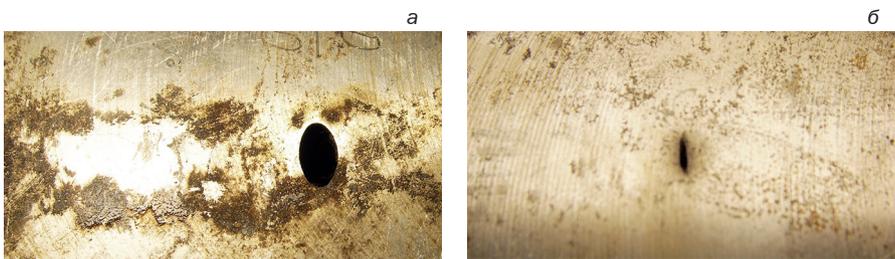


Рис. 6. Модели дефектов, использовавшиеся при измерениях в 1988 и 2017 годах: а — округлый; б — плоскостной

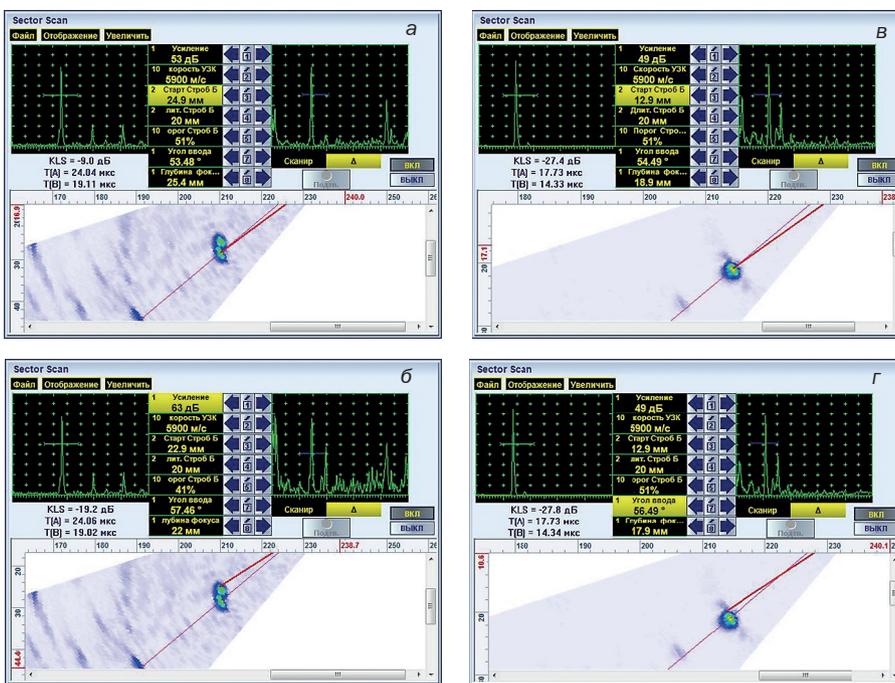


Рис. 7. Результаты измерений: а, б — в центре плоскостного отражателя и на его кромке; в, г — в центре округлого отражателя и на его кромке

- величина K_{\perp}^* для модели округлого отражателя составила 0 дБ, для модели плоскостного отражателя (на кромке) ≈ 18 дБ;
- при измерении в центре отражателя и на краях на плоскостном отражателе разница в значениях $K_{\perp}(K_{\parallel})$ значительная, что соответствует разной остроте кромок отражателя. Например, видно, что на рис. 7а значение $K_{\perp}(K_{\parallel})$ составляет $-19,2$ дБ, на рис. 7б $-9,0$ дБ;

- при измерении в центре отражателя и на краях на округлом отражателе разницы в значениях $K_{ij}(K_{is})$ нет (на рис. 7в значение K_{is} составляет -27,4 дБ, на рис. 7г -27,8 дБ);
- результаты измерений с применением ФР-преобразователя (2017 г.) и специализированного ПЭП (1988 г.) качественно совпадают (табл. 1).

Реальные дефекты

Результаты идентификации реальных дефектов, таких как вертикальная трещина, межслойный непровар и несплавление по кромке, подтвержденные после вскрытия шва, показаны на рис. 5, 8, 9.

Выводы

К сожалению, большинство широко разрекламированных и практически повсеместно применяемых ФР-дефектоскопов не обеспечивают преимущественность технологии, так как при их создании опыт практической дефектоскопии, накопленный десятилетиями, и созданные при этом эффективные технические решения просто игнорировались: исторически сложилось так, что большинство ФР-дефектоскопов, количество типов которых продолжает расти высокими темпами, созданы и продолжают создаваться путём прямого копирования функциональных и схематических решений, применяемых в медицинской ультразвуковой технике. В результате приборы, создаваемые таким образом, в основном отличаются друг от друга цветом, сортом пластика в корпусе, и ценой, не обладая какими-либо специальными качествами, отличающими их от аналогичного оборудования.

Результаты настоящей работы показывают значимость альтернативного подхода к созданию современной аппаратуры, позволяющей реализовать на новом уровне уникальные и эффективные решения актуальных задач, полученные до цифровой эры. При соответствующем методическом подходе это должно способствовать значительному сокращению затрат на поиски «новых» решений, которые, на самом деле, давно существуют и готовы к немедленному практическому применению на подходящей современной платформе.

Авторы выражают благодарность Михаилу Аккалайнену (НИИ мостов) и Алексу Лapidусу (Sonotron NDT) за полученные ими экспериментальные результаты с ФР-преобразователями, использованные в статье.

Табл. 1. Выборочные результаты измерений K_{ij} -способом специализированным ПЭП и ФР-преобразователем

Год	Дефектоскоп/преобразователь	Модель отражателя	K_{ij} *, дБ
1988	Специализированный ПЭП, аналоговый дефектоскоп	округлый	1
2017	Типовой ФР-преобразователь, ФР-дефектоскоп		0
1988	Специализированный ПЭП, аналоговый дефектоскоп	плоскостной (кромка)	16
2017	Типовой ФР- преобразователь, ФР-дефектоскоп		18–20

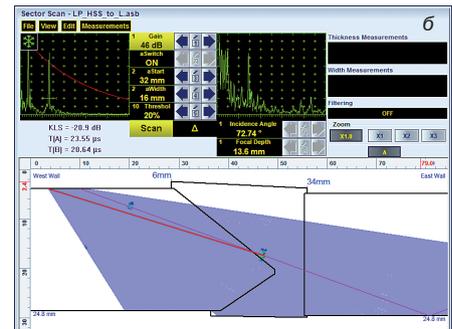
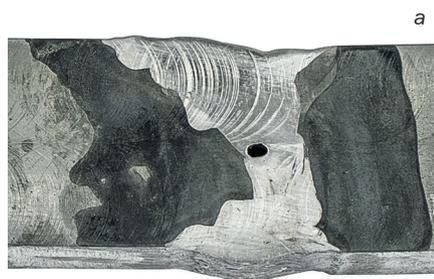


Рис. 8. Межслойный непровар (округлый дефект, а); его отображение при прозвучивании сечения способом секторного сканирования и результаты оценки K_{ij} -способом (б)

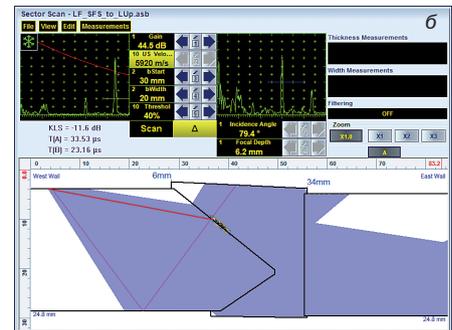


Рис. 9. Несплавление по кромке шва (плоскостной дефект, а); его отображение при прозвучивании сечения способом секторного сканирования и результаты оценки K_{ij} -способом (б)

Литература

1. Цомук С.Р. Идентификационные признаки дефектов при УЗК. — В мире НК. 2010. № 4. С. 14–17.
2. ГОСТ Р 55724–2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. — М.: Стандартинформ, 2014. — 24 с.
3. Krautkremer J. and H. Ultrasonic Testing of Materials. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1990. — 677 p.
4. Гурвич А.К., Дымкин Г.Я., Цомук С.Р. Способ ультразвукового контроля/Авт. свид. 1201754 (СССР). — Бюлл. изобр. 1985. № 48.
5. Гурвич А.К., Дымкин Г.Я., Цомук С.Р. Новый информативный признак формы дефекта. — Дефектоскопия. 1990. № 11. С. 3–7
6. Пасси Г. УЗК с использованием преобразователей на фазированных решетках. 1. Излучение и прием ультразвуковых сигналов с применением фазированных решеток. — В мире НК. 2010. № 3. С. 12–16 (оригинал статьи до-

ступен по ссылке http://www.sonotronndt.com/NDTWORLD/2010_3/49_12_16.pdf).

7. Пасси Г. Технология фазированных решеток — современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке. — В мире НК. 2009. № 2. С. 56–64 (оригинал статьи доступен по ссылке http://www.sonotronndt.com/NDTWORLD/2009_2/44_56_64.pdf).
8. Sonotron NDT presents on-the-fly defect pattern analysis whilst performing S-Scan material coverage. — NDT.NET. 2017. V.22. No.2. (публикация доступна по ссылке <http://www.ndt.net/search/docs.php?id=20780&content=1>).
9. Воронков В.А., Ермолов И.Н. Измерение высоты корневой трещины с помощью двух ультразвуковых преобразователей. — Дефектоскопия. 1990. № 11. С. 8–13.

Статья получена 9 марта 2017 г.,
в окончательной редакции — 16 марта

ISONIC 3510

Обнаружение несплавления по кромке шва и идентификация плоскостного дефекта по дополнительному эхо-сигналу продольной волны, дифрагированной на краю отражателя

<https://www.youtube.com/watch?v=ofeaq1AmNcQ>



Обнаружение усталостной трещины (прием дифрагированного сигнала)
между зубьями на внутренней стороне эпицикла планетарного
редуктора системы механизации крыла самолета

https://www.youtube.com/watch?v=uhC_UjKG1pc

