

Ультразвуковой двухмодовый контроль аустенитных сварных швов вакуумной камеры термоядерного реактора ITER

В.В.Гребенников, А.Х. Вopilкин, Д.В.Гребенников, В.Г. Бадалян, В.А.Крылов.
Научно- производственный центр «ЭХО +», Россия, 123182, площадь Курчатова,
д.1. Тел.: 196-71-19; Факс 196-73-86; E-mail: echoplus@co.ru

1. Введение

Возможность существенного (на 12-14дб) повышения отношения сигнал/структурный шум при использовании ультразвуковых (УЗ) голографических методов в сочетании с двухмодовым и с двухчастотным способами по сравнению с традиционными (одночастотными и одномодовыми) была показана нами ранее[1]. Для получения двухмодовых (двухчастотных) голографических В, С и D-изображений использовалась система типа АВГУР[2] со программным обеспечением, реализующим алгоритм логического сложения изображений полученных на двух видах волн (продольных и сдвиговых) или на двух частотах [3].

Полученные результаты исследований были использованы при создании специальных сканеров, аппаратуры и программного обеспечения аустенитных сварных швов большой толщины макета вакуумной камеры термоядерного реактора ИТЭР, создаваемого общими усилиями ряда стран: стран Европейского союза, Японии, Канады, России и до недавнего времени США.

2. Оборудование. Для УЗ контроля была использована система АВГУР 4.2 ITER, разработанная НПЦ «Эхо+» (Москва). В неё входили: системный блок, выносной блок, линейный и радиальный сканеры, пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), система подачи контактной жидкости, индикаторное табло о положении опор сканера, комплект кабелей, калибровочный стенд, стандартные образцы СО-2 СО-3 (ГОСТ 14782-86) [4].

3. Специальные сканеры.

Проблема заключалась не только в необходимости обеспечения помехоустойчивого контроля аустенитных сварных швов толщиной 40-60мм с высоким уровнем структурных помех, но и в реализации дистанционного УЗ контроля аустенитных сварных со сложной формой и в условиях ограниченности околошовного пространства. Необходимость проведения дистанционного УЗ контроля диктовалась условиями эксплуатации будущего термоядерного реактора, и, прежде всего высокими радиационными полями, а также особенностями конструкции реактора. Общий вид сектора вакуумной камеры ИТЭР с технологическими патрубками показан на рис.1. Конструкция вакуумной камеры (включая патрубки) имеет две стенки с рёбрами жёсткости внутри.

Сложность конструкции изделия диктовала необходимость создания сканеров, приспособленных для установки на место контроля, с помощью специального робота. Такой робот был сконструирован и изготовлен фирмой Boeing(США). Были сконструированы и изготовлены два вида сканеров: линейный и угловой (рис.2). Первый из них позволял контролировать прямолинейные сварные швы, к которым можно отнести все сварные соединения непосредственно вакуумной камеры, а также прямолинейные участки технологических патрубков. Угловой сканер позволял проконтролировать криволинейные сварные швы технологических патрубков изнутри с радиусами кривизны 250мм и 350мм соответственно. Оба вида сканеров позволяли контролировать сварные соединения в труднодоступных местах типа «колодца» с удалением ПЭП от поверхности базирования сканера на ≈150мм (при сварке внешней оболочки вакуумной камеры).

4. Интеграция с роботом.

Для манипуляции со сканерами с целью их установки на контролируемый участок шва робот и соответственно сканеры снабжались посадочными гнёздами типа «ласточкина хвоста», которые обеспечивали надёжный захват и удержание сканера в любом пространственном положении. Робот позволял перемещать сканер вместе с кабелями и трубками для подачи контактной жидкости и устанавливать его в различных пространственных положениях при контроле аустенитных сварных швов сектора и удлинительного патрубка вакуумной камеры. Точность установки составляла 1-2мм. Кроме того, робот обеспечивал необходимое усилие прижима сканера к поверхности изделия.

Для обеспечения надёжного контроля заданного участка соединения сканер необходимо прижимать к поверхности изделия с определённым усилием (\approx нтн), для этого четыре опоры сканера были встроены датчики, которые выдавали информацию об усилиях прижима на каждой опоре. Это давало возможность, манипулируя рукой сканера робота обеспечить необходимое усилие прижима сканера, а также избежать перекоса. Информация о нормальном прижиме сканера к поверхности индицировалась на специальном табло с помощью световых индикаторов (см. рис.2е – видно на переднем плане).

3. Двухмодовые пьезопреобразователи.

Для УЗ контроля аустенитных сварных швов использовались ПЭП с рабочей частотой 2,5МГц и углами ввода 45° и 60°. Устройство прижима позволяло ПЭП «заезжать» на валик усиления, максимальная высота которого составляла 3мм. Определённое усилие прижима ПЭП к контролируемой поверхности изделия обеспечивалось специальным устройством прижима гнёзд крепления ПЭП. Гнёзда имели карданные подвески. Всего в каждом сканере имелось по четыре гнезда для ПЭП. Каждое гнездо было снабжено эластичной юбкой и каналами подвода контактной жидкости, а также устройством регулировки зазора между поверхностями ПЭП и изделия.

Для создания акустического контакта использовалась дистиллированная вода. Подача воды осуществлялась с помощью миниатюрного насоса с возможностью регулировки расхода жидкости. Имелась возможность для сбора воды и повторного её использования (после фильтрации).

4. Калибровка системы.

Чтобы обеспечить необходимую чувствительность и разрешающую способность аппаратуры во время контроля проводилась калибровка пьезопреобразователей и всей системы. Для калибровки системы АВГУР использовались стандартные образцы СО-2 и СО-3[4] и специально разработанный калибровочный стенд. Для калибровки использовался линейный сканер. Линейный сканер, установленный в калибровочный стенд вместе с образцом СО-2, показан на рис.3а . На Рис.3б,с,д ,е приведены диаграммы направленности, спектральный состав и формы импульсов, полученных при калибровке на стандартном образце СО-2 по боковому отверстию \varnothing 3мм на глубине 15мм.

5. Методика УЗ контроля

УЗ контроль аустенитных сварных швов проводился в двух режимах: **в обзорном и экспертном**. Схема контроля показана на Рис.4. Апертуры и шаги перемещения даны в Таблице 1. Обзорный режим использовался для обнаружения дефектов. При этом два верхних окна экране дисплея компьютера (рис.5) получают с Таблица 1.

Апертуры и шаги перемещения пьезопреобразователей в обзорном и экспертном режимах.

Режим контроля	Апертура перемещения по X, мм	Апертура перемещения по Y, мм	Шаг перемещения по X, мм	Шаг перемещения по Y, мм
1. Обзорный	10-70	220* 440**	4	2
2. Экспертный	10-70	Участки для контроля выбираются по результатам обзора	0,27	2,5 4

Примечание: *- для линейного сканера; **для радиального сканера.

использование сдвиговых волн с двух сторон от шва: верхнее левое - N1 - изображение с негативной стороны шва, верхнее правое - P1- изображение с позитивной стороны шва. Два средних окна получают с использованием продольных волн: левое среднее окно - C1-соответствует контролю с негативной стороны от шва, правое среднее окно - C2 – соответствует контролю с позитивной стороны от шва. В двух нижних окнах на экране дисплея в процессе обзорного режима наблюдают изображения поперечных дефектов (акустические оси ПЭП - N2, P2 параллельны оси шва, для чего используются дополнительные ПЭП). Двухмодовое (неголографическое) обзорное изображение получают в режиме “off line” (левое нижнее изображение - Рис. 5). Отношение полезный сигнал/шум для двухмодового обзорного изображение составляло ≈бдБ. Из рис.5 видно, что в двухмодовом режиме D-изображение очищается от структурных и реверберационных шумов.

Области экспертного контроля выделялись на основе анализа обзорных данных с помощью специальных маркеров. После включения экспертного режима система автоматически сканировала эти области и записывала А-сканы (амплитуды эхо-сигналов: $A(x,y,z,t)$). Изображения высокого разрешения выделенных участков сварного соединения получались после обработки А- сканов с помощью специальной программы. Голографическая обработка повышала отношение полезный сигнал /шум по сравнению с обзорными данными примерно на бдБ. Дополнительное повышение упомянутого отношения (не менее чем на бдБ) достигалось путем объединения изображений, полученных на продольных и сдвиговых волнах. При этом использовался специальный алгоритм двухмодового голографического контроля. Таким образом, при экспертном голографическом контроле отношение сигнал/шум повышалось не менее чем на 12дБ по сравнению с контролем известными методами. Двухмодовые голографические изображения (В, С и D проекции) использовались для измерения размеров дефектов и оценки качества шва.

6. Результаты ультразвукового контроля.

На макете сектора вакуумной камеры ИТЭР в 2000г. в JAERI (г. Токай, Япония) был выполнен ультразвуковой контроль монтажных аустенитных сварных швов

толщиной 40-45мм. Некоторые акустические изображения обнаруженных дефектов представлены на рис. 6-7. Стрелками белого цвета на изображениях обозначены дефекты. Каждая стрелка указывает на один дефект. Стрелки, выходящие из одной точки соответствуют одному и тому же протяженному дефекту.

Характерными дефектами были непровары в корне сварного шва, по линии сплавления, а так же точечные дефекты. Некоторые обнаруженные непровары имели значительную протяженность, что связано, по-видимому, с нарушениями режимов автоматической сварки на некоторых участках.

На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что разработанный двухмодовый способ позволяет надежно выявлять дефекты и с достаточной для практики прочностью измерять их размеры. Полученные результаты будут использованы при отработке технологии сварки вакуумной камеры ИТЭР.

7. Вывод.

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что УЗ контроль аустенитных сварных швов двухмодовым способом позволяет надежно выявлять дефекты различного типа с разрешающей способностью не хуже 2мм.

7. Литература.

1. Comparative Analysis of the Ways to Increase Signal to Noise Ratio at NDT Inspection of Austenitic Welds. V.Grebennikov, V.Badalyan, D.Grebennikov, A.Vopilkin. Proceedings of 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 15-21 October 2000 in Rome.
2. Augur 4.2 ultrasonic system: features, reliability, application to on-site expert examination of primary circuit piping. Bougaenko S.E., Arefiev A.A., Strelkov B.P. (RDIPE, Russia), Arjaev A.I. (ECS MAE RDIPE, Russia), Vopilkin A.Kh., Badalyan V.G., Grebennikov D.V., Tikhonov D.S. ("Echo+", Russia), Aladinsky V.V., Makhanev V.O. (SRC NPO TSNIITMASH, Russia), European-American Workshop Determination of Reliability and Validation Methods of NDE, June 18 - 20, 1997, Berlin.
3. Акустическая голография - эффективный метод контроля аустенитных швов. В.В.Гребенников, В.Г.Бадалян, А.Х.Вопилкин, Д.В.Гребенников. (НПЦ ЭХО+, Москва), Сборник докладов XVI Петербургской конференции "Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций. Информативность и достоверность. УЗДМ-98". Санкт-Петербург (Репино), 3 - 5 июня 1998 г.
4. Nondestructive testing. Welded joints. Ultrasonic methods. GOST 14782-86. Russian standard.

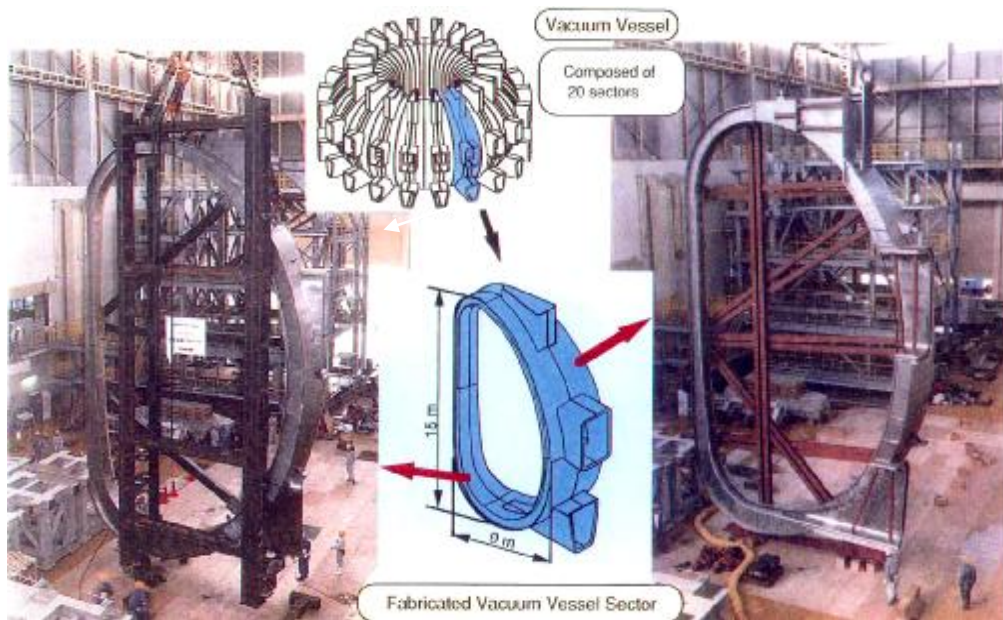


Рис.1. Сектор вакуумной камеры макета термоядерного реактора ИТЭР в JAERI (Япония). В центре: сверху схематическое изображение вакуумной камеры реактора, внизу – сектора с технологическими патрубками.

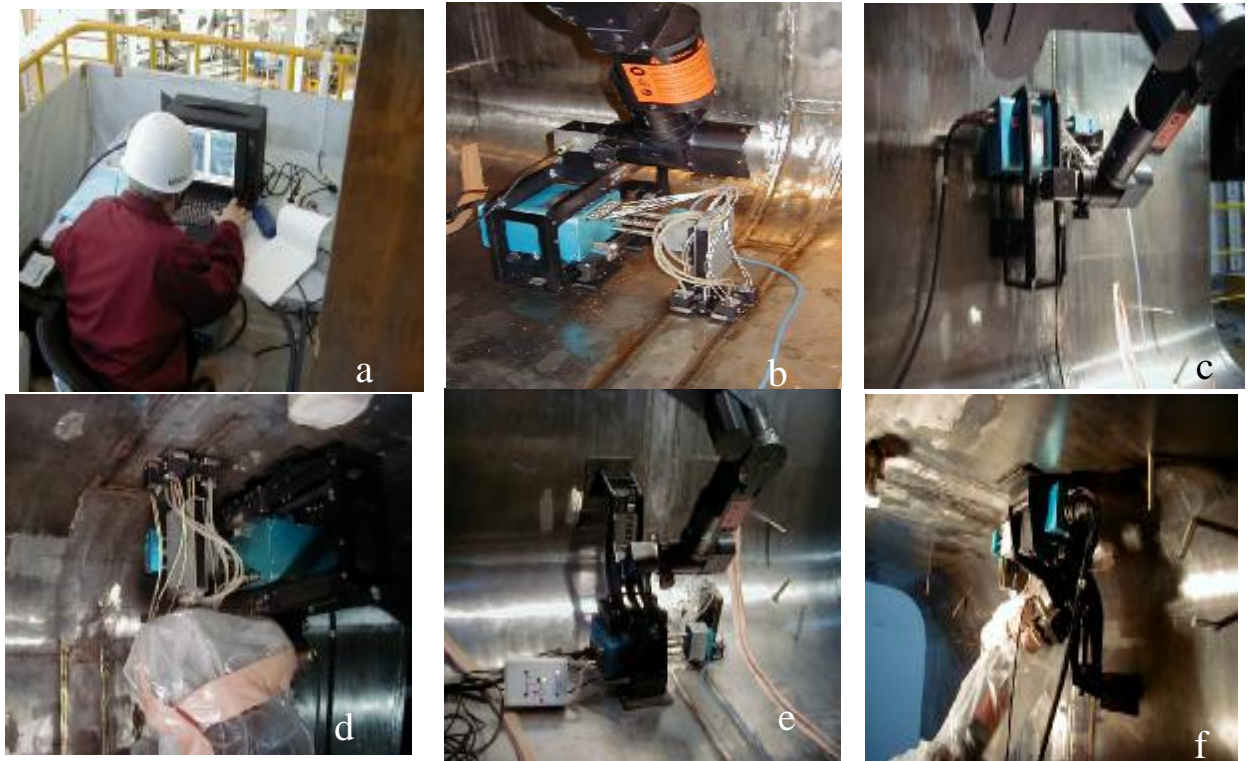


Рис 2. Системный блок (а), линейный (b,c,d) и радиальные сканеры (е, f) в процессе контроля.

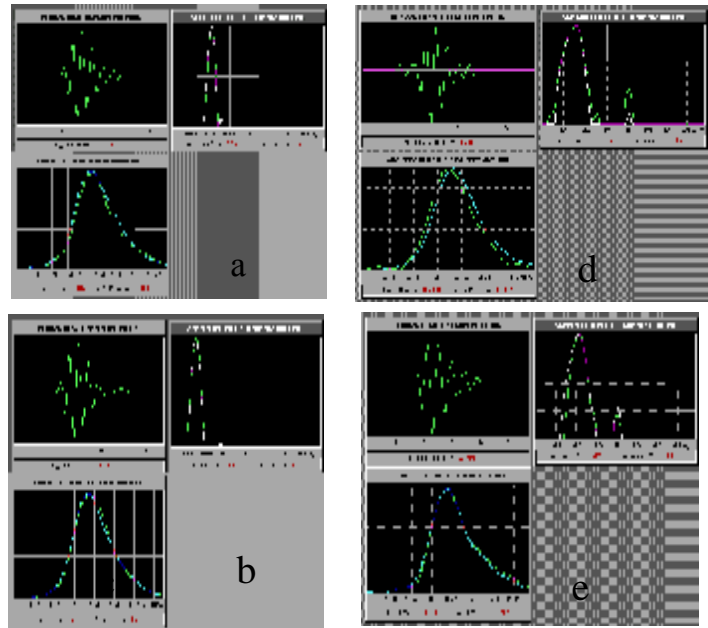


Рис.3. Стенд для калибровки ПЭП. На переднем плане видны стандартные образцы СО-2 и СО-3[4]. Импульсная и спектральная характеристики, диаграмма направленности. ПЭП с углом ввода $\approx 60^\circ$ и $\approx 45^\circ$. Сдвиговые волны (два левых изображения), продольные волны (два правых изображения).

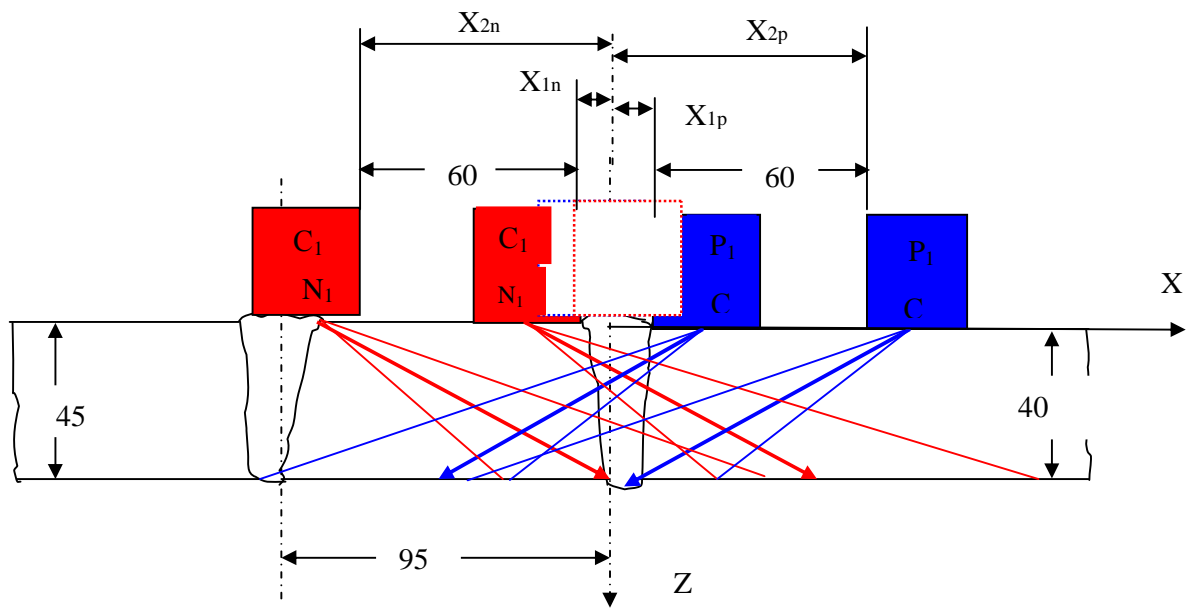


Рис.4. Схема контроля сварных соединений патрубков вакуумной камеры ИТЭР.

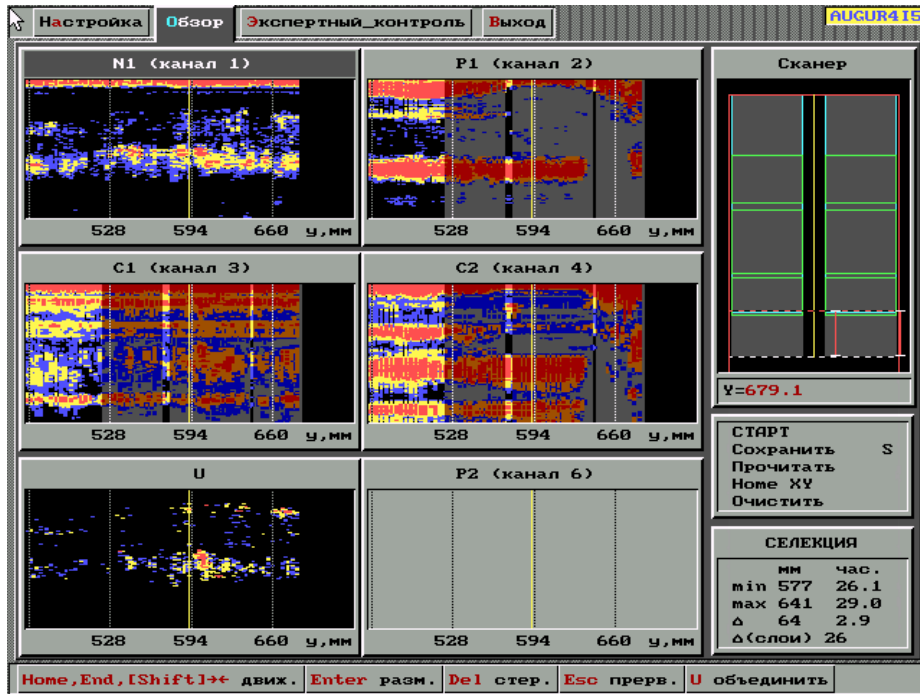


Рис.5. Результаты обзорного контроля. Двухмодовое обзорное изображение показано в левом нижнем углу. Непровар в корне сварного шва.

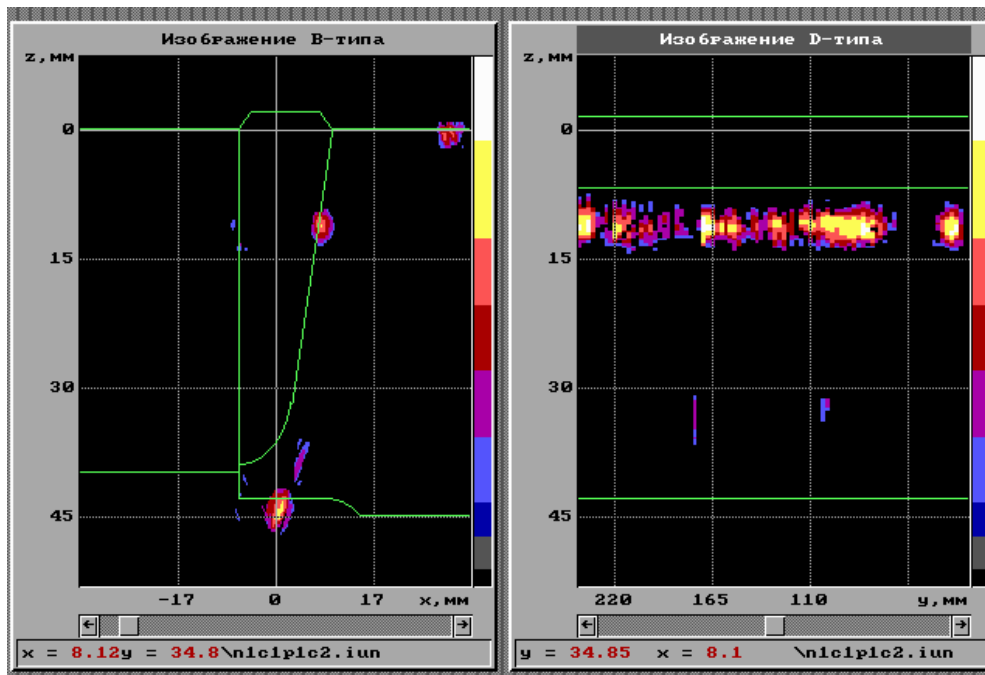


Рис.6. Неплавление по границе сварного шва.

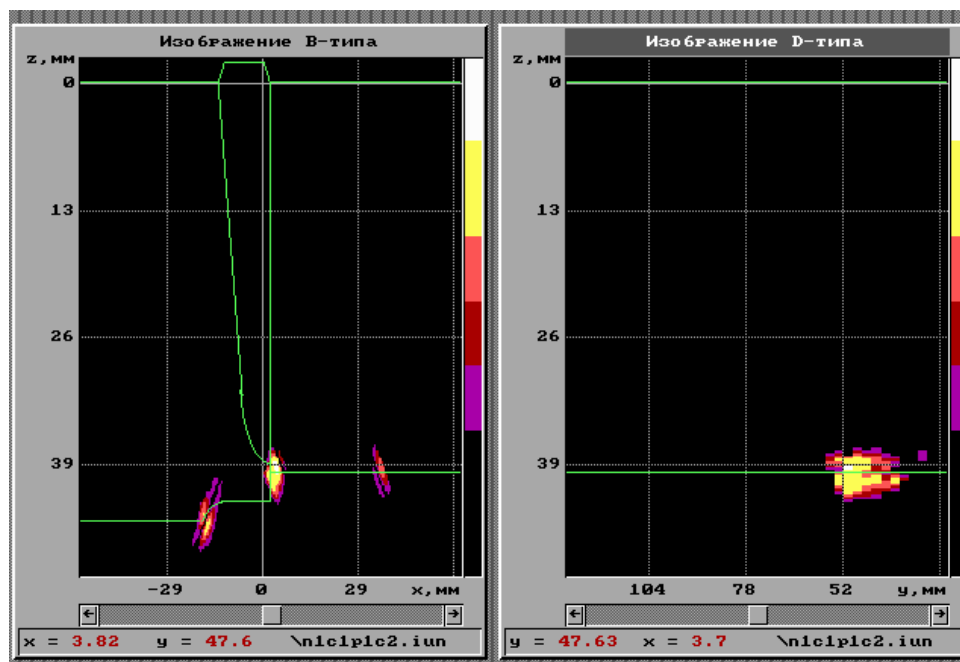


Рис.7. Непровар в корне шва. Слева и видны изображение конструктивных элементов соединения (выточек).

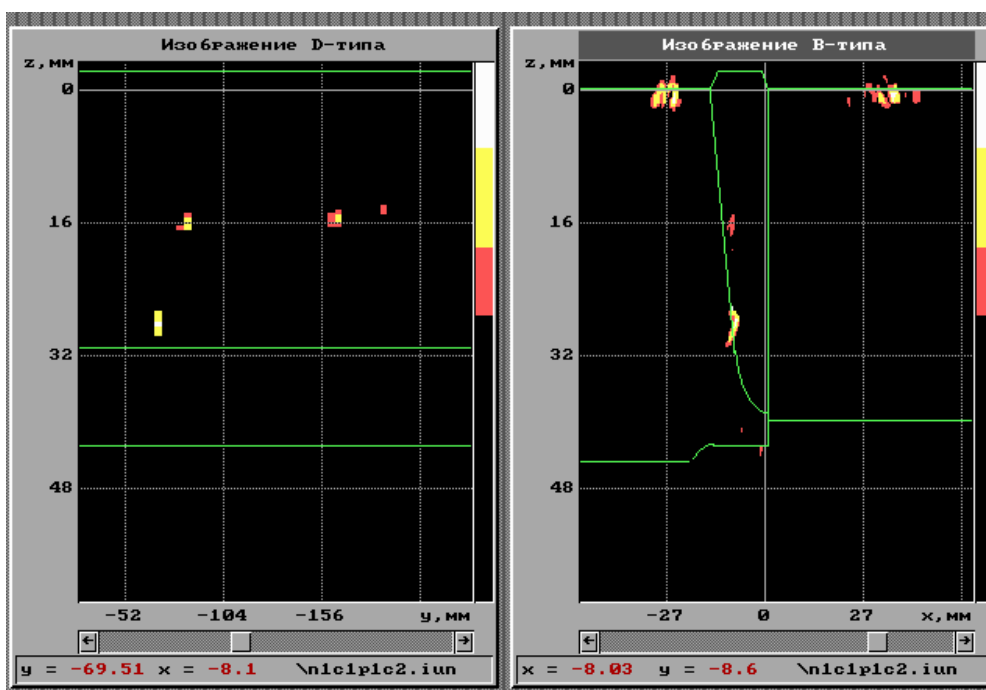


Рис. 8. Изображения точечных дефектов в аустенитном сварном шве.