

УДК 53.087:620.19

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28

## Способы оценки реальных размеров дефектов на основе длин их фронтальных образов

М. Н. Давыдов, А. П. Липатова, Ю. С. Ткаченко ✉

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 394026, Россия, г. Воронеж,  
Московский проспект, 14

✉ e-mail: kafedra-ao@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Публикация посвящена пристальному анализу выявления размеров дефектов и способов их определения. Целью является решение задачи рационального выбора оборудования, которое даст возможность в полной мере наглядно и достаточно достоверно судить о качестве изделия. Это важно, поскольку в зависимости от материала изделия, получаемые размеры дефектов могут отличаться.

**Методы.** Для этого в данной статье рассматривается метод определения реальных размеров образов дефектов при ультразвуковом контроле корпусов магистральных нефтяных насосов из стали марки 20ГЛ с применением дефектоскопа с цифро-фокусированными антенными решетками. Описаны основные отличия при настройке оборудования, использующего различные способы восстановления изображения, и целесообразность применения многоканальных датчиков при контроле деталей данного типа. Рассмотрена конструкция антенной и фазированной решетки, принцип работы датчиков с ФАР и ЦФАР. Проведено исследование литого корпуса магистрального нефтяного насоса, в ходе которого были обнаружены дефекты типа «рыхлота». Определены их максимально допустимые фронтальные протяженности и выведена формула определения их реального размера. Рассмотрена зависимость фронтальных размеров образов дефектов от глубины их залегания в изделии.

**Результаты.** По полученным данным построен график зависимости фронтального размера образа от глубины залегания. С помощью этого графика можно определить максимально допустимые размеры образов дефектов для промежуточной глубины, исключая расчеты, что подтверждает экономическую эффективность при анализе результатов контроля, используя данный метод.

**Заключение.** Авторами обоснована целесообразность применения оборудования с ФАР и ЦФАР.

---

**Ключевые слова:** детали литые; детали корпусные; контроль неразрушающий; контроль ультразвуковой; решетка антенная.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Давыдов М. Н., Липатова А. П., Ткаченко Ю. С. Способы оценки реальных размеров дефектов на основе длин их фронтальных образов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 18-28. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28.

## Methods for Estimating the Actual Size of Defects Based on the Lengths of Their Frontal Images

Maxim N. Davydov, Anastasia P. Lipatova, Yury S. Tkachenko ✉

Voronezh State Technical University, 14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russian Federation

✉ e-mail: kafedra-ao@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The present paper concerns the close analysis of detecting the sizes of defects and ways of their identification. The aim is to solve the problem of rational choice of equipment, which will make it possible to fully, clearly and reliably judge the quality of the product. This is important because, depending on the material of the product, the resulting defect sizes may vary.

**Methods.** For this purpose, this article discusses a method for determining the actual size of defects' images in ultrasonic control of export oil pump cases made of 20GL steel grade using a flaw detector with digital-focused antenna arrays. The paper describes the main differences in the configuration of equipment that uses different techniques of image restoration, and the feasibility of applying multi-channel sensors for the control of this type parts. The design of the antenna array and phased antenna array has been considered as well as the principle of operation of sensors with phased array antenna and digital phased array antenna. The study of the cast body of export oil pump has been completed, during which defects such as "microporosity" was found. There have been identified their maximum permissible front distances and the formula to determine their actual size has been deduced. The dependence of frontal sizes of defect images on the depth of their occurrence in the product has been considered.

**Results.** According to the obtained data, a graph of dependence of the frontal size of a defect image on the depth of occurrence has been constructed. Using this graph, it is possible to determine the maximum permissible sizes of defect images for intermediary depth, excluding calculations, which confirms the economic efficiency in the analysis of the control results using this method.

**Conclusion.** The authors substantiate the feasibility of using equipment with phased array antenna and digital phased array antenna.

---

**Keywords:** cast parts; case-shaped parts; non-destructive control; ultrasonic control; antenna array.

**Conflict of interest.** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Davydov M. N., Lipatova A. P., Tkachenko Y. S. Methods for Estimating the Actual Size of Defects Based on the Lengths of Their Frontal Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 18-28 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28.

\*\*\*

### Введение

Новые технологии активно занимают место в нашей жизни. Это коснулось и методов неразрушающего контроля (НК), с помощью которых воз-

можно увеличить срок эксплуатации изделия за счет своевременного устранения дефектов и минимизировать риски экономических потерь, а в ряде случаев избежать аварии, которая может

возникнуть из-за применения изделий ненадлежащего качества. Развитие цифровой электроники позволило расширить возможности некоторых из них.

Одним из этих методов стал ультразвуковой контроль (УК), основанный на применении упругих колебаний и волн в объекте контроля (ОК). Он позволяет получить информацию о дефектах, расположенных как на поверхности изделия, так и на различных глубинах [3]. В настоящее время он активно развивается, и современные приборы включают передовые решения в области микроэлектроники и вычислительной техники. К таким приборам относятся дефектоскопы с применением цифро-фокусированными антенными решетками (ЦФАР) и фазированными антенными решетками (ФАР), которые позволяют визуализировать внутреннюю структуру изделия и производить контроль с изменением угла ввода.

Данные приборы имеют ряд преимуществ, в сравнении с классическими дефектоскопами, что вызывает огромный интерес со стороны специалистов, стремящихся повысить достоверность и надежность контроля, и производителей, целью которых является повышение качества и срока службы выпускаемой продукции.

Целью работы является сравнение работы ультразвуковых дефектоскопов с ФАР и ЦФАР при контроле литых корпусов магистральных нефтяных насосов из стали марки 20ГЛ и определение реальных размеров дефектов.

## Материалы и методы решения задачи

Объектом исследования является литой корпус магистрального нефтяного насоса (МНН), изготовленный из стали марки 20ГЛ. Ультразвуковому контролю подвергают радиусные переходы от корпуса к карману сбора утечек нефти – зона А (рис.1).

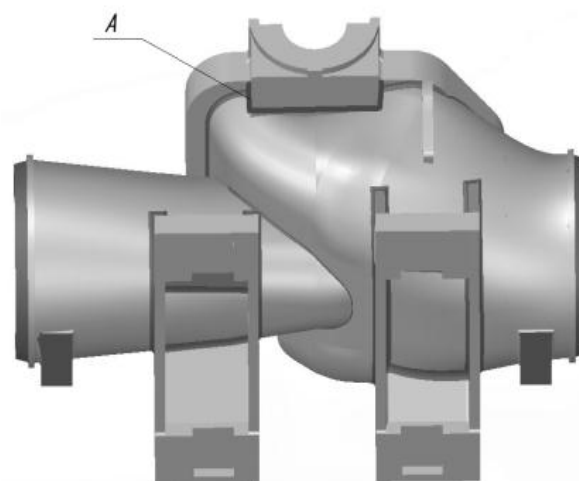


Рис. 1. Литой корпус МНН

Одним из самых распространенных дефектов в изделиях данного типа являются усадочные раковины (рис. 2), рыхлоты (рис. 3) и пористость (рис. 4).



Рис. 2. Усадочная раковина



Рис. 3. Рыхлота

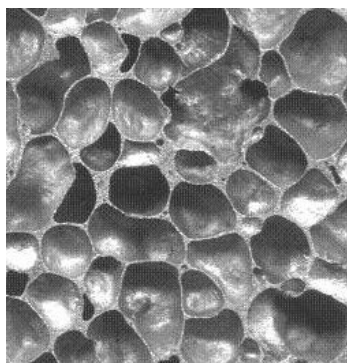


Рис. 4. Пористость

Основные причины их возникновения связаны с неправильным питанием отливки жидким металлом, большой температурой заливки, нарушением характеристик формы для выплавки или самой конструкцией отливки [3].

Испытания проводятся с применением следующего оборудования:

- ультразвуковой дефектоскоп-томограф A1550 IntroVisor (рис. 5);
- ультразвуковой дефектоскоп на фазированных решетках УСД-60ФР (рис. 6).

В отличие от классического УК, который подразумевает наличие одноэлементного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), данные приборы позволяют работать с многоэлементными датчиками [4].



Рис. 5. Ультразвуковой дефектоскоп A1550 IntroVisor

Несколько источников УЗ волн суммируются и создают суммарный волновой фронт, который может быть задержан во времени так, чтобы получился сфокусированный и управляемый по фазе и амплитуде луч (рис. 7).



Рис. 6. Ультразвуковой дефектоскоп УСД-60ФР

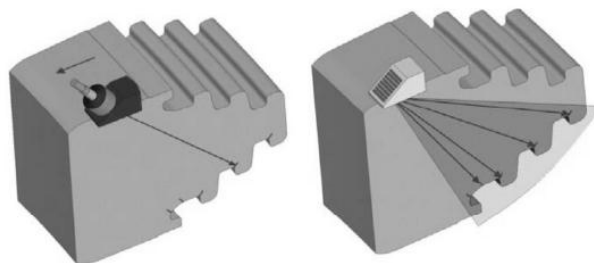


Рис. 7. Одноэлементный ПЭП (слева) и многоэлементный ПЭП (справа)

Основное преимущество и особенность технологии фазированных антенных решеток – это амплитуда и фаза импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов, которая управляется компьютером. Это позволяет изменять угол

ввода луча, фокусное расстояние [5]. Благодаря этому появляется возможность обнаруживать различно ориентированные относительно акустической оси дефекты (рис. 8).

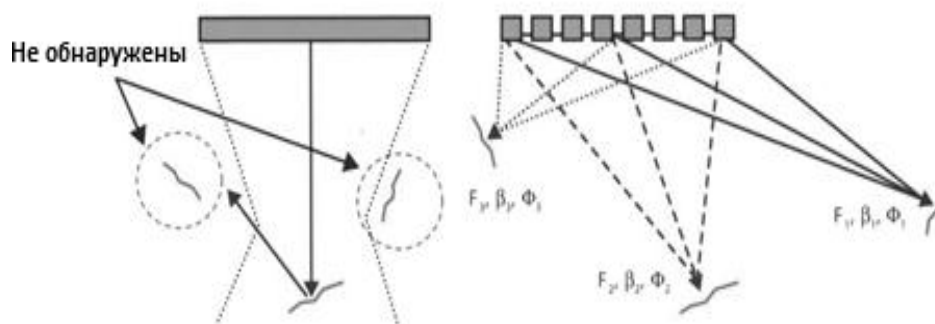


Рис. 8. Обнаружение дефектов одноэлементным ПЭП (слева) и многоэлементным ПЭП (справа)

Данные приборы имеют некоторые различия в способе восстановления изображения. Ультразвуковой дефектоскоп-томограф A1550 IntroVisor регистрирует эхосигналы, излученные и принятые каждым элементом антенной решетки (АР), и далее строит изображение по зарегистрированным эхосигналам. В приборах с ФАР фокусировка происходит путем изменения задержки сигналов возбуждения каждого элемента фазированной решетки (рис 9).

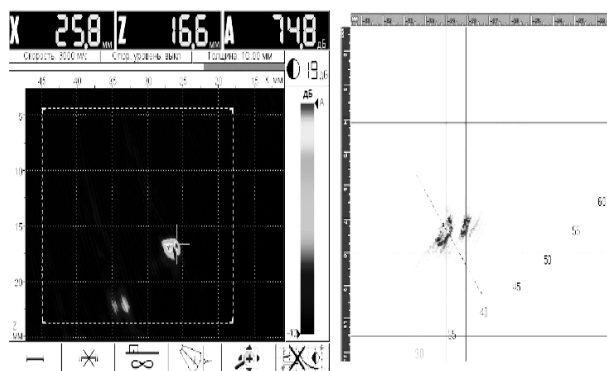


Рис. 9. Сравнение ЦФАР (слева) и ФАР (справа)

В состав A1550 IntroVisor входит электрический блок и антенная решетка (АР) (рис. 10), которая представляет собой набор однотипных пьезоэлементов, расположенных вдоль одной линии на протекторе [6].

УСД-60ФР так же включает электрический блок и ультразвуковой преобразователь с ФАР (рис. 11). Конструкция датчика отличается наличием съемной призмы из рексолита.



Рис. 10. Внешний вид АР





Рис. 11. Ультразвуковой дефектоскоп УСД-60ФР

Настройка оборудования производится с помощью калибровочного образца (стандартный образец предприятия (СОП)). СОП является средством контроля и его изготавливают в соответствии с требованиями ведомственных методических документов на контроль, из материала, имеющего такие

же акустические свойства, что и объект контроля, так же воспроизводят его форму и шероховатость поверхности.

Для контроля МНН применяется СОП №4 (рис. 12) с плоскодонными отверстиями, диаметр которых равен размеру максимально допустимых дефектов в контролируемом изделии в соответствии с нормативно-технической документацией (НТД).

Настройка дефектоскопа производится путем получения образов на экране прибора от всех контрольных отражателей (КО) [7].

Установив датчик УЗ прибора А1550 IntroVisor в положение (1) (рис. 13), на экране получаем изображение (рис. 14). Отчетливо наблюдаются образы от КО 1 и КО 2, расположенные на глубине 10 и 25 мм.

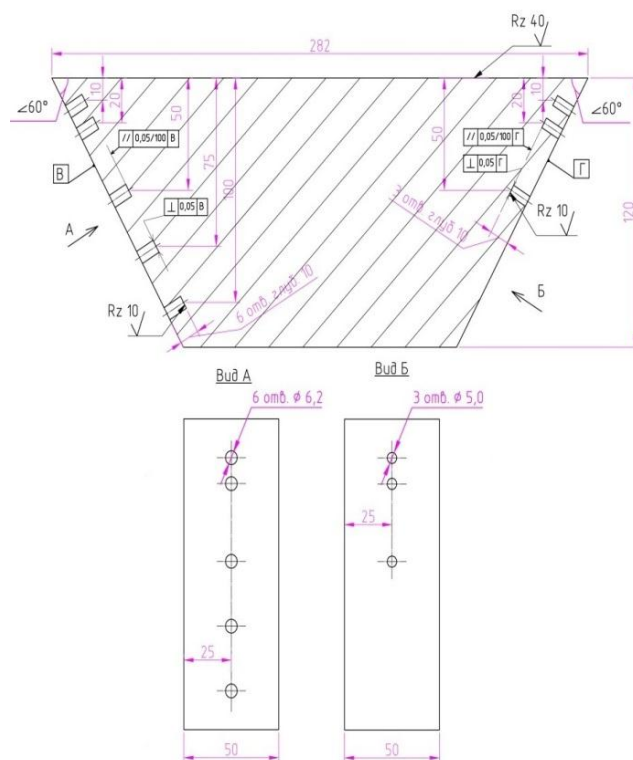


Рис. 12. Стандартный образец предприятия (СОП)

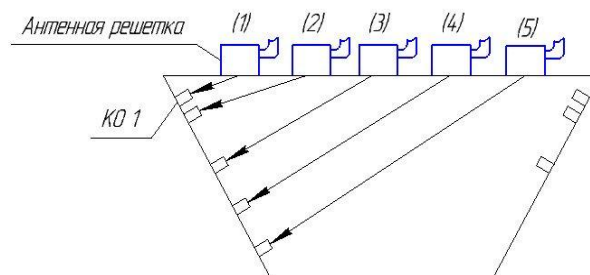


Рис. 13. Положения АР на СОП во время настройки

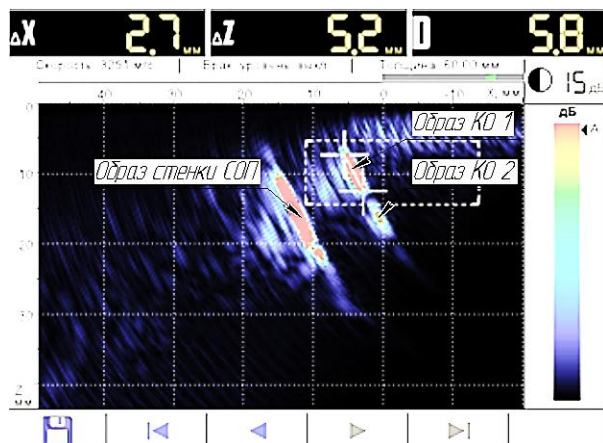


Рис. 14. АР установлена в положение (1)

Линейно перемещая АР по поверхности СОП, в положения (2), (3), (4) и (5) (рис. 13), получаем сигналы от КО 2, КО 3, КО 4 и КО 5, глубины которых: 25, 50, 75 и 100 мм.

С помощью встроенных функций дефектоскопа производится измерение фронтальных размеров образов D, полученных от всех КО [8]:

- $D_1 = 5.8$  мм ну глубине  $Z_1 = 10$  мм;
- $D_2 = 6.4$  мм ну глубине  $Z_2 = 20$  мм;
- $D_3 = 11.0$  мм ну глубине  $Z_3 = 50$  мм;
- $D_4 = 18.9$  мм ну глубине  $Z_4 = 75$  мм;
- $D_5 = 22.2$  мм ну глубине  $Z_5 = 100$  мм.

Измеренный параметр D – это максимально допустимый фронтальный размер дефекта на различных глубинах.

В результате этих измерений установлена зависимость фронтального раз-

мера образа КО от глубины. Например, отверстие диаметром 6,2 мм на экране прибора на глубине 100 мм видится равным 22,2 мм (рис. 15).

Данная зависимость является линейной. По полученным результатам построен график зависимости фронтального размера от глубины залегания дефекта (рис. 16). Этот график позволяет без математических расчетов определять значения фронтальных размеров для промежуточных глубин залегания дефектов, что во многом экономит время при анализе результатов контроля.

Используя прибор УСД-60ФР предоставляется возможность уйти от понятия «фронтальная протяженность образа», используя встроенную функцию регулировки чувствительности по углу ввода (УРЧ) [9].

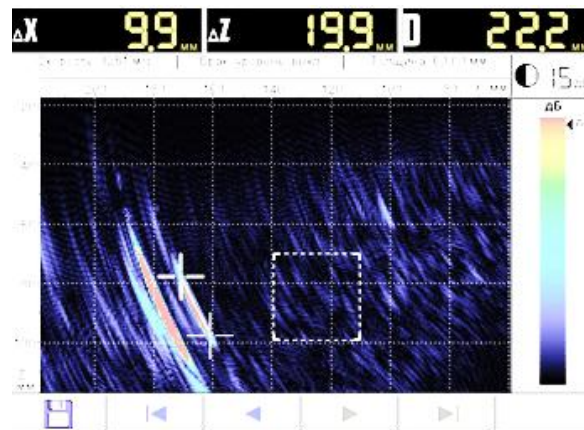


Рис. 15. Образ КО на глубине 100 мм

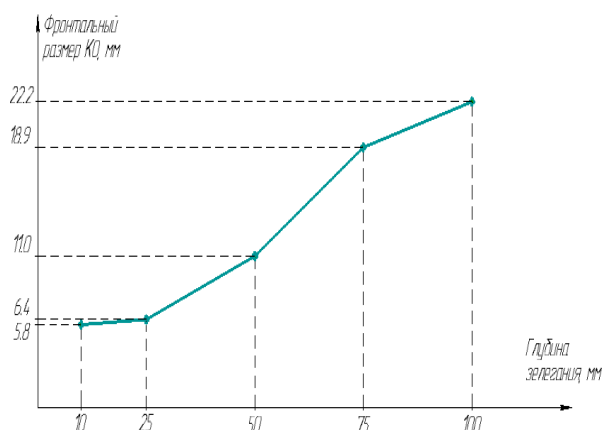


Рис. 16. График зависимости фронтального размера от глубины

Настройка производится по тому же принципу – получением всех сигналов от КО в СОП. Основное различие заключается в том, что производится сравнение амплитуд сигналов от дефектов, а не размеров образов, как на A1550 IntroVisor.

Устанавливаем датчик на СОП и с помощью встроенных функций дефектоскопа устанавливаем точки на полученном образе от КО (рис. 17).

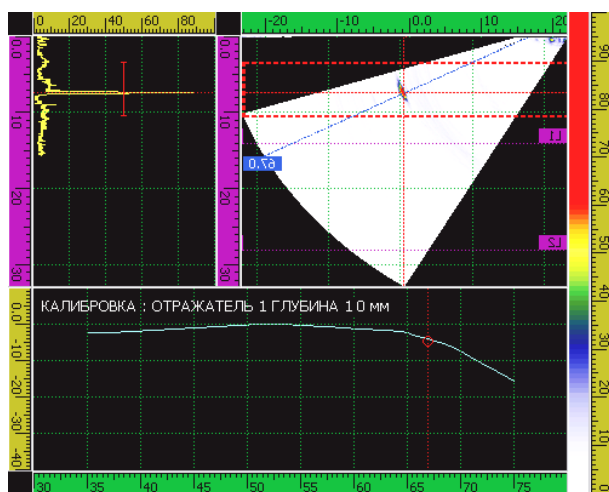


Рис. 17. Образ от КО на экране УСД-60ФР

Прибор запоминает показание усиления в буфере памяти. Сделав эту операцию со всеми КО, производится по-

строение кривой зависимости чувствительности от угла ввода.

В результате этой коррекции размеры от всех КО на различных глубинах будут одинаковыми, что позволяет не производить пересчет размеров фронтальных протяженностей (рис. 18).

### Результаты исследований и их обсуждение

При проведении контроля, обнаружив дефект, необходимо определить следующие параметры:

- фронтальная протяженность, мм;
- амплитуда эхосигнала, дБ;
- продольная протяженность, мм;
- координаты от точки начала сканирования.

При возникновении образов на экране прибора требуется прекратить сканирование и найти максимум амплитуды образа, путем перемещения АР. Необходимо убедиться, что полученный образ принадлежит несплошности, а не ложному отражателю, источником которых могут быть сигналы от конструктивных элементов изделия [10].

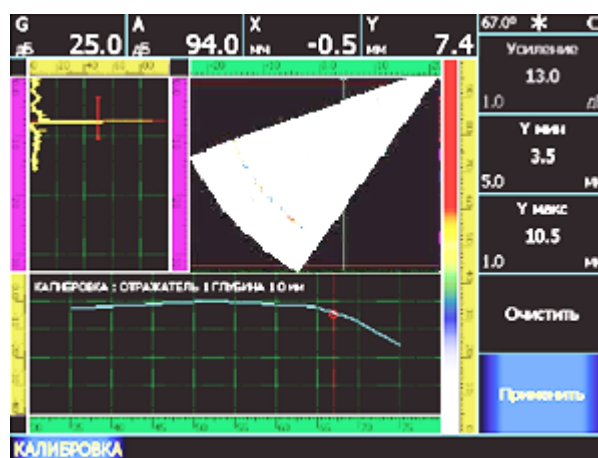


Рис. 18. Образы КО на различных глубинах



На рис. 19 представлен образ от противоположной стенки радиусного перехода. Отличить его от дефекта просто, так как он имеет протяженность по всей конструктивной толщине отливки в данном месте контроля.

На рис. 20 изображен визуальный образ дефекта типа «рыхлота», найденный при помощи A1550 IntroVisor.

Для нахождения реального размера несплошности выведена формула

$$D = \frac{D_{КО}}{D_{max}} * D_x, \quad (1)$$

где  $D_{КО}$  – диаметр КО;

$D_{MAX}$  – максимально допустимый фронтальный размер для данной глубины;

$D_x$  – фронтальный размер обнаруженного образа.

$$D = \frac{6.2}{11.0} * 23.7 \approx 13.36 \text{ мм.}$$

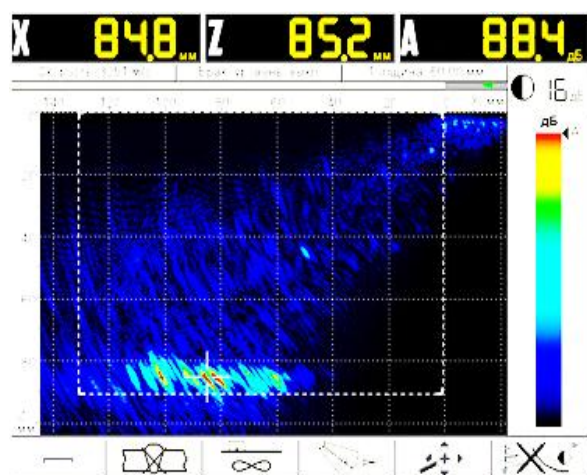


Рис. 19. Образ стенки отливки

Дефект №1 был обнаружен в фрагменте радиусного перехода корпуса магистрального нефтяного насоса. На рис. 21 представлен этот фрагмент с залегающим в нем дефекте типа «рыхлота».

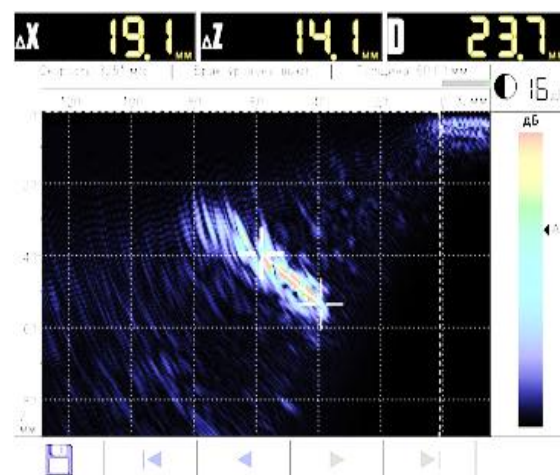


Рис. 20. Дефект №1



Рис. 21. Фрагмент литого корпуса МНН (×5)

## Выводы

Ультразвуковой контроль литых корпусных деталей с применением оборудования с ФАР и ЦФАР применять целесообразно, так как появляется возможность наглядно и достаточно достоверно судить о качестве изделия.

Используя A1550 IntroVisor наблюдается зависимость фронтального размера образа дефекта от глубины его залегания в изделии. Составив график зависимости фронтального размера об-

раза от глубины его залегания, упрощается и ускоряется поиск значения допустимого размера для промежуточных глубин.

Использование УСД-60ФР позволяет уйти от пересчета фронтальных

размеров образов, используя функцию регулировки чувствительности по углу ввода (УРЧ), что позволяет сократить время при оценке и анализе результатов контроля.

### Список литературы

1. Давыдов М.Н., Ткаченко Ю.С. Особенности выявления различно-ориентированных в пространстве дефектов ультразвуковым методом, с применением антенных решеток // Авиаперспектива: региональный сб. науч. тр. Воронеж, 2017. Вып. 1. С. 148-157.
2. Дефектоскоп ультразвуковой A1550 IntroVisor. Руководство по эксплуатации. М., 2015. 88 с.
3. Зацепин А.Ф. Акустический контроль / под ред. чл.-кор. РАН, проф., д-ра техн. наук В.Е. Щербинина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 211 с.
4. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. М., 1989. 15 с.
5. Бирюков Д.Ю. Преобразователи и методы неразрушающего контроля. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 179 с.
6. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. 2 изд. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
7. Заглянуть в металл. Теперь это просто / В.Г. Шевалдыкин, С.Г. Алехин, А.В. Бишко, А.В. Дурейко, А.А. Клементьев, Н.Ю. Соколов, А.А. Самокрутов // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 1 (39). С. 46-53.
8. Методические указания по применению ультразвукового дефектоскопа A1550 IntroVisor с цифро-фокусированными антенными решетками в режиме ТОМОГРАФ. М., 2014. 82 с.
9. НПЦ КРОПУС УСД-60ФР Ультразвуковой дефектоскоп на фазированных решетках. Руководство пользователя. М., 2018. 59 с.
10. Пасси Г.С. Технология фазированных решеток – современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке // В мире неразрушающего контроля. 2009. № 2 (44). С. 56–64.

Поступила в редакцию 12.03.2019

Подписана в печать 04.04.2019

### References

1. Davydov M.N., Tkachenko Ju.S. Osobennosti vyjavlenija razlichno-orientirovannyh v prostranstve defektov ul'trazvukovym metodom, s primeneniem antennyh reshetok. Aviaperpektiva. Regional'nyj sb. nauch. tr. Voronezh, 2017, is. 1, pp. 148-157 (In Russ.).

2. Defektoskop ul'trazvukovoj A1550 IntroVisor. Rukovodstvo po jekspluatacii. Moscow, 2015, 88 p. (In Russ.).
3. Zacepin A.F. Akusticheskij kontrol'; ed. by Shherbinin V.E. Ekaterinburg, 2016, 211 p. (In Russ.).
4. GOST 19200-80. Otlivki iz chuguna i stali. Terminy i opredelenija defektov. Moscow, 1989, 15 p. (In Russ.).
5. Birjukov D.Ju. Preobrazovateli i metody nerazrushajushhego kontrolja. Ekaterinburg, 2008, 179 p. (In Russ.).
6. Hansen R.S. Fazirovannye antennnye reshetki. Moscow, Tehnosfera Publ., 2012, 560 p. (In Russ.).
7. Shevaldykin V.G., Alehin S.G., Bishko A.V., Durejko A.V., Klement'ev A.A., Sokolov N.Ju. Samokrutov A.A. Zagljanut' v metall. Teper' jeto prosto. *V mire nerazrushajushhego kontrolja*, 2008, no. 1 (39), pp. 46-53 (In Russ.).
8. Metodicheskie ukazaniya po primeneniju ul'trazvukovogo defektoskopa A1550 IntroVisor s cifro-fokusirovannymi antennnymi reshetkami v rezhime TOMOGRAF. Moscow, 2014, 82 p. (In Russ.).
9. NPC KROPUS USD-60FR Ul'trazvukovoj defektoskop na fazirovannyh reshetkah. Rukovodstvo pol'zovatelja. Moscow, 2018, 59 p. (In Russ.).
10. Passi G.S. Tehnologija fazirovannyh reshetok – sovremennaja realizacija peredovyh reshenij v oblasti UZK, nakoplenykh v proshlom veke. *V mire nerazrushajushhego kontrolja*, 2009, no. 2 (44), pp. 56–64 (In Russ.).

Received 12.03.2019

Accepted 04.04.2019

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Давыдов Максим Николаевич**, аспирант,  
Воронежский государственный технический  
университет, г. Воронеж, Российская  
Федерация, e-mail: mountaln@mail.ru,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0586-5244>

**Maxim N. Davydov**, Post-Graduate Student,  
Voronezh State Technical University,  
Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: mountaln@mail.ru,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0586-5244>

**Липатова Анастасия Павловна**, магистр,  
Воронежский государственный  
технический университет, г. Воронеж,  
Российская Федерация,  
e-mail: pavlovnana@mail.ru

**Anastasia P. Lipatova**, Master's Student,  
Voronezh State Technical University,  
Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: pavlovnana@mail.ru «

**Ткаченко Юрий Сергеевич**, доктор  
технических наук, профессор, Воронежский  
государственный технический университет,  
г. Воронеж, Российская Федерация,  
e-mail: kafedra-ao@mail.ru

**Yury S. Tkachenko**, Doctor of Engineering  
Sciences, Professor, Voronezh State Technical  
University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: kafedra-ao@mail.ru