

УДК 621.791

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ШВОВ,  
ВЫПОЛНЕННЫХ С СОПУТСТВУЮЩЕЙ ВИБРАЦИОННОЙ  
ОБРАБОТКОЙ**

**ULTRASOUND CONTROL OF WELDED JOINTS  
EXECUTED ALONG WITH VIBRATION PROCESSING**

**И.Р. Мамлиев, А.Ш. Янбарисов, А.М. Файрушин**

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация**

**Inar R. Mamliiev, Artur S. Yanbarisov, Ayrat M. Fairushin**

**Ufa State Petroleum Technological University,  
Ufa, Russian Federation**

**e-mail: mamlievilnar@mail.ru**

**Аннотация.** Опыт производства сварного нефтегазового оборудования показывает, что в процессе сварки неизбежно в сварном шве возникают различные дефекты (трещины, непровары, прожоги, поры и т.д.). Большинство из этих дефектов могут оказать значительное влияние на эксплуатационные характеристики всей конструкции и даже вызвать её разрушение, в связи с чем дефектные швы требуют исправления.

Особое внимание уделяется выявлению внутренних дефектов сварных швов, определение которых в изготовленных сварных конструкциях возможно только применением способов неразрушающего контроля, таких как ультразвуковые, радиационные, акустико-эмиссионные, магнитопорошковые и т.д.

Ультразвуковой контроль является одним из наиболее распространенных способов неразрушающего контроля сварных соединений. Это практически единственный способ, который может с высокой точностью показать не только расположение дефекта и его форму, но и глубину залегания. Точность определения дефекта, его местоположение и глубина залегания имеют важное значение при проведении ремонтных работ.

Однако известно, что в пластически деформированном металле скорость ультразвука меняется, и результаты ультразвукового контроля на таких участках будут показывать некорректную информацию.

В данной работе представлен результат ультразвукового исследования сварного шва, выполненного дуговой сваркой с сопутствующей вибрационной обработкой и искусственно заложенным дефектом. Сопоставлены результаты ультразвукового контроля и визуально-измерительного контроля среза шва в зоне дефекта.

**Abstract.** Experience in the production of welded oil and gas equipment shows that during welding various defects inevitably arise in the weld (cracks, lack of penetration, burn-through, pores, etc.). Most of these defects can have a significant impact on the performance of the entire structure and even cause its destruction, and therefore defective welds require reworking.

Particular attention is paid to the detection of welded joints with internal defects, which can only be determined in manufactured welded structures using non-destructive testing methods such as ultrasonic, radiation, acoustic emission, magnetic particle inspection, etc.

Ultrasonic testing is one of the most common methods of non-destructive testing of welded joints. This is actually the only method that can register the position of the defect, its form and the depth of location. The accuracy of the defect determination, its location and depth of location are taken into consideration during the maintenance operation.

However, the speed of ultrasonic sound is known to change in the metal plastically formed; so the results of ultrasonic control will have a high degree of inaccuracy.

In this report, the result of ultrasonic testing of the welded joint is shown; this joint has been performed by electric arc welding with accompanying vibration treatment, and with the man-made defect. The results of the ultrasonic testing and the results of the visual inspection control of the joint edge in the defect location have been compared.

**Ключевые слова:** сварной шов, виброобработка, ультразвуковая дефектоскопия, дефект

**Key words:** welded joint, vibration processing, ultrasonic flaw detection, defect

Основным способом получения неразъемных соединений является сварка. В нефтегазовой промышленности сварка применяется не только во время изготовления аппаратов и сосудов, но и во время монтажа, а также ремонта данных аппаратов. Сварной шов является концентратором напряжений, основными причинами возникновения которых являются неравномерность нагрева и усадки сварного шва, структурные изменения металла и зоны термического влияния. Кроме напряжений, в сварном шве могут возникнуть различные дефекты, такие как несплавления, газовые поры, подрезы, холодные и горячие трещины и др., способные разрушить конструкцию.

Для снижения сварочных напряжений и деформаций, улучшения механических свойств сварного соединения часто применяют различные виды термической обработки. Данный процесс не только трудоемкий и требует больших энергозатрат, но также сложно применим для крупногабаритных конструкций [1].

В настоящее время для снятия остаточных напряжений и предотвращения возникновения дефектов предлагается применение сопутствующей виброобработки сварного шва в процессе сварки. Для создания вибрации применяют специальные вибровозбудители. В данном случае вибрационные колебания воздействуют не только на затвердевший металл сварного соединения, но и на сварочную ванну в процессе её кристаллизации. Этот метод дает возможность получить наибольший диапазон положительных результатов от вибрационной обработки [2]. При этом в процессе обработки возможно протекание микропластических деформаций, которые дают положительный эффект в снижении сварочных напряжений и деформаций.

Для выявления внутренних сварных дефектов применяют различные методы неразрушающего контроля: цветная дефектоскопия, магнитопорошковая дефектоскопия, ультразвуковая дефектоскопия, рентгенографический контроль, акустико-эмиссионный, магнитный метод и т.д.

Ультразвуковой метод является одним из основных методов неразрушающего контроля. Данный метод основан на исследовании процесса распространения упругих колебаний в контролируемом изделии. Ультразвуковые волны, используемые в дефектоскопии, представляют собой упругие колебания частотой от 20 до 500 кГц, возбуждаемые в материале изделия. Ультразвуковые волны обладают способностью проникать в глубь металла, что используется при выявлении весьма незначительных внутренних дефектов [3].

Преимущества ультразвукового контроля:

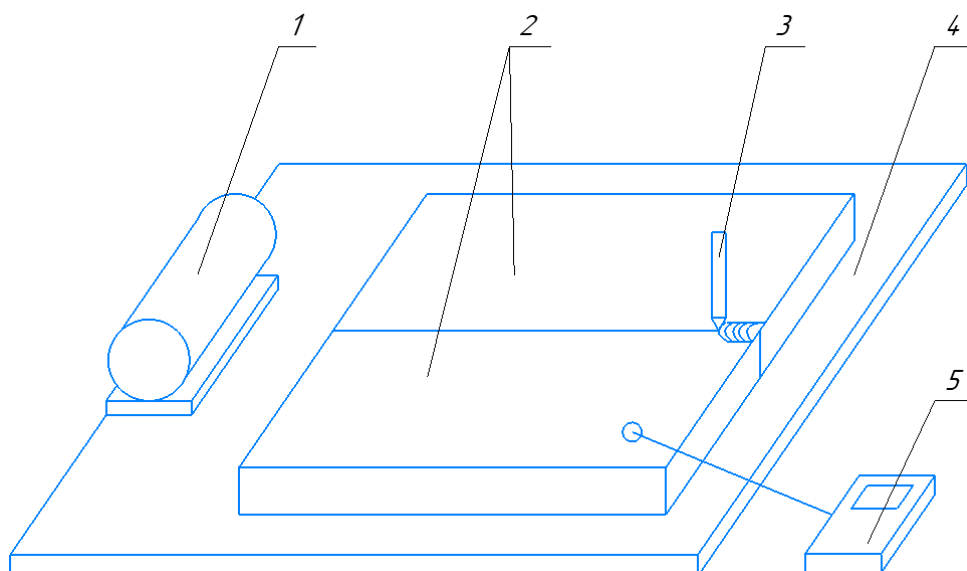
- высокая чувствительность, позволяющая обнаруживать незначительные дефекты;
- высокая проникающая способность ультразвуковых колебаний, позволяющая выявлять внутренние дефекты в крупногабаритных изделиях;

- определение местоположения, размера и характера дефектов;
- возможность контроля сварных швов при одностороннем доступе к ним (сложные конструкции);
- мобильность, простота и высокая производительность.

При выборе метода контроля исходят из определенных требований: толщины сварного соединения, типа сварного соединения, состояния соединенных поверхностей, физических свойств металла, технико-экономических показателей метода контроля и др. [3-5].

Одной из особенностей ультразвукового метода контроля является чувствительность данного способа к изменению деформированного состояния металла. Объясняется это тем, что с изменением межатомного расстояния изменяется скорость прохождения ультразвуковых колебаний [6]. При сопутствующей виброобработке расплавленный металл в процессе своего затвердения подвергается воздействию быстро чередующихся динамических импульсов. Кристаллизующийся металл при воздействии циклических колебаний, возможно, будет испытывать пластические деформации, в связи с чем дефекты сварного соединения могут определяться в процессе ультразвукового контроля с определенными погрешностями.

В данной статье приводится исследование влияния сопутствующей вибрационной обработки на точность выявления (местоположение, размеры, тип) дефекта с помощью ультразвукового контроля. Схема сварки пластин с наложением сопутствующей вибрационной обработки представлена на рисунке 1 [7].



1 – вибратор электромеханический; 2 – свариваемые пластины;  
 3 – сварочный электрод; 4 – сварочный стол; 5 – прибор  
 для контроля параметров вибрации вибротест-МГ4+

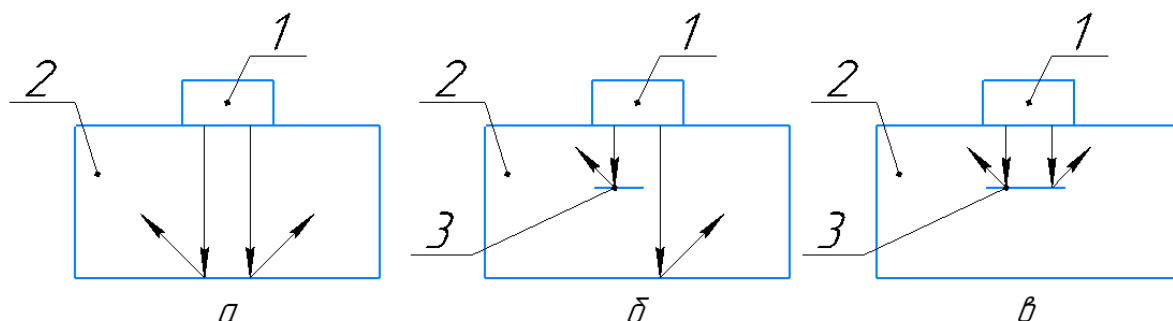
**Рисунок 1.** Схема сварки с сопутствующей вибрационной обработкой

При планировании исследований также были учтены рекомендации А.С. Рогозина [8] о правомерности использования выводов о дефектности только по результатам контроля испытуемых образцов, содержащих искусственные дефекты нормированных размеров, формы и местоположения.

Для проведения эксперимента использованы пластины толщиной 10 мм из стали 09Г2С с разделкой двух кромок. Вид соединения С17 ГОСТ 5264-80. Образцы сваривались электродами УОНИ 13/55 диаметром 3 мм. Амплитуда виброобработки составляла 0,5-0,8 мм, частота 50 Гц. После сварки корневого слоя, введен искусственный дефект размерами ~ 3 x 3 x 2 мм.

При обследовании пластины использовали эхо-импульсный метод ультразвукового контроля. Этот метод – в отличие от других – применим при одностороннем доступе к исследуемому объекту, и при этом позволяет определить характер дефектов, идентифицировать их по размерам, формам и ориентации.

Сущность контроля эхо-импульсного метода (рисунок 2) состоит в том, что в деталь посылают короткие импульсы длительностью 1-3 мкс ультразвуковых колебаний с интервалом 1-5 мс.



**Рисунок 2.** Схема эхо-импульсного метода

Излучающий преобразователь одновременно используется в качестве приемника. В момент посылки импульса на экране прибора возникает скачок. Ультразвуковой импульс проходит через изделие 2 и возвращается к излучателю, отражаясь от ее противоположной стороны. Приход отраженного сигнала регистрируется прибором (рисунок 2, а). При наличии в шве дефекта 3 на экране прибора появляется новый добавочный сигнал (рисунок 2, б). Если дефект полностью перекрывает ультразвуковой пучок, то на экране прибора скачок от отраженного импульса будет отсутствовать (рисунок 2, в). Величина этого сигнала дает представление о размерах дефекта, а интервал между вводом в изделие начального импульса и приемом отраженного сигнала позволяет определить глубину его залегания. Тип данного преобразователя наклонный, т.е. преобразователь излучает поперечную волну под углом к поверхности.

Зачищенную поверхность металла непосредственно перед контролем протирали и наносили на неё слой контактной смазки, чтобы обеспечить акустический контакт между щупом-искателем и изделием. В качестве смазки использовали машинное масло. Контактные жидкости для ультразвукового контроля используются для обеспечения хорошего контакта между ультразвуковым преобразователем и контролируемой

поверхностью, препятствуя образованию воздушного зазора, создающего помехи звуковому импульсу.

Технологическая последовательность процесса ультразвукового контроля состояла из следующих этапов:

- визуальный и измерительный контроль;
- предварительная подготовка изделия к контролю;
- настройка дефектоскопа;
- поиск и выявление дефектов;
- определение местоположения, размера дефектов;
- оформление результатов контроля.

После сварки последующих слоев пластины были исследованы с помощью ультразвукового дефектоскопа OmniScan SX. В таблице 1 представлены основные настройки дефектоскопа.

**Таблица 1.** Основные настройки дефектоскопа OmniScan SX

Задержка луча	Режим	Наклон ПЭП	Тип волны	Скорость звука
11us	И-Э (имп.-эхо)	270,0	поперечная	3240,0 m/s

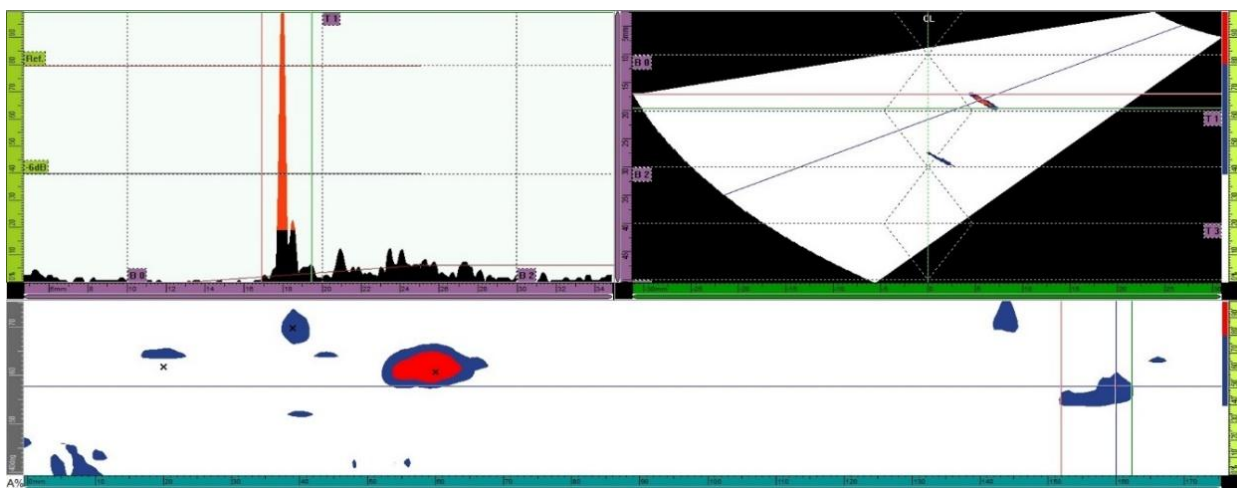
В месте введенных дефектов ультразвуковым дефектоскопом выявлено несплавление. Местоположение и размеры представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Местоположение и размер дефекта

Глубина залегания дефекта	Высота дефекта	Начало дефекта	Протяженность дефекта
3,16 мм	3,52 мм	52,41 мм	16,56 мм

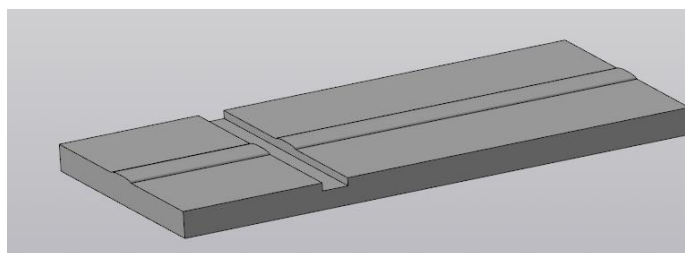
Условная схема ультразвукового исследования сварного шва изображена на рисунке 3.





**Рисунок 3.** Схема изображения дефекта

Для определения достоверности контроля и получения объективной информации о реальной дефектности сварного шва была проведена послойная разрезка шва вдоль соединения, схема представлена на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Схема послойной разрезки шва

Пластина после снятия первого слоя и среза представлена на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Пластины после среза слоев

В таблице 3 представлены результаты измерений ультразвукового контроля и после среза.

**Таблица 3.** Сравнение результатов

	Начало дефекта, мм	Глубина залегания дефекта, мм	Высота дефекта, мм	Протяженность дефекта, мм
Результаты УЗК	52,41	3,16	3,52	16,56
Результаты послойного среза	52,0	3,2	3,7	16
Относительная погрешность, %	0,8	1,25	4,86	3,5

Анализируя результаты измерений, можно прийти к выводу, что погрешность измерений составляет менее 5 %.

Для полноты эксперимента также были сварены пластины 09Г2С без наложения вибрационных колебаний. В таблице 4 представлен результат УЗК.

**Таблица 4.** Местоположение и размер дефекта, мм

Глубина залегания дефекта	Высота дефекта	Начало дефекта	Протяженность дефекта
1,55	2,94	12,52	4,84

Для определения достоверности ультразвукового контроля пластина разрезана на две части в зоне залегания дефекта. Фото пластины после среза представлены на рисунке 6.



**Рисунок 6.** Фото пластины после среза

В таблице 5 сопоставлены результаты ультразвукового контроля и разреза.

**Таблица 5.** Результаты УЗК и послойного среза

	Начало дефекта, мм	Глубина залегания дефекта, мм	Высота дефекта, мм	Протяженность дефекта, мм
Результаты УЗК	12,52	1,55	2,94	4,84
Результаты послойного среза	12,7	1,6	3,0	5,0
Относительная погрешность, %	1,4	3,125	2	3,2

Проведя анализ результатов измерений, можно прийти к выводу, что относительная погрешность измерений в образце, сваренном по применяемым технологиям, составляет до 3,2 %.

### **Выводы**

Результаты исследований показали, что расположение дефекта в образцах, сваренных с сопутствующей вибрационной обработкой, определяется с относительной погрешностью не более 5 %.

Установлено, что виброобработка не искажает расположение и размеры дефекта, следовательно, ультразвуковой метод исследования применим для неразрушающего контроля сварных образцов, выполненных с сопутствующей виброобработкой.

### **Список используемых источников**

1. Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Каретников Д.В. Влияние параметров вибрационной обработки в процессе сварки на свойства сварных соединений // Литье и металлургия. 2012. № 3. С. 337-342.

2. Латыпов А.А. Совершенствование технологии вибрационной обработки сварных корпусов аппаратов: автореф. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2016.

3. Троицкий В.А., Попов В.Ю. Ультразвуковой контроль сварных соединений. Киров: Феникс, 2010. 224 с.

4. Халимов А.Г., Зайнуллин Р.М., Халимов А.А. Техническая диагностика и оценка ресурса нефтегазохимического оборудования. СПб.: Недра, 2012. 568 с.

5. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. М.: МГТУ им. Баумана, 2000. 496 с.

6. Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Бушмелева К.И. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al // Журнал технической физики. 2000. Т. 70, Вып. 1. С. 52-56.

7. Файрушин А.М., Каретников Д.В., Романчук А.С. Исследование влияния вибрационной обработки стали 09Г2С в процессе сварки на металле сварного шва // Современные проблемы машиностроения: XI Междунар. науч.-техн. конф. Томск, 2017. С. 50-58.

8. Коробцов А.С., Рогозин Д.В. Критерии качества ультразвукового контроля сварных соединений // Вестник Донского государственного технического университета. 2011. № 11 (10). С. 1756-1762.

## References

1. Rizvanov R.G., Fayrushin A.M., Karetnikov D.V. Vliyanie parametrov vibratsionnoy obrabotki v protsesse svarki na svoystva svarnykh soedineniy [Influence of Vibration Treatment Parameters During Welding on the Properties of Welded Joints]. *Lit'ye i metallurgiya – Foundry Production and Metallurgy*, 2012, No. 3, pp. 337-342. [in Russian].

2. Latypov A.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii vibratsionnoi obrabotki svarnykh korpusov apparatov: avtoref. ... kand. tekhn. nauk.* [Improvement of Technology of Vibration Processing of Welded Bodies of Devices: Cand. Engin. Sci. Avtoref.]. Ufa, USPTU, 2016. [in Russian].

3. Troitskiy V.A., Popov V.Yu. *Ul'trazvukovoy kontrol' svarnykh soedineniy* [Ultrasonic Inspection of Welded Joints]. Kirov, Feniks, 2010. 224 p. [in Russian].

4. Khalimov A.G., Zaynullin R.M., Khalimov A.A. *Tekhnicheskaya diagnostika i otsenka resursa neftegazokhimicheskogo oborudovaniya* [Technical Diagnostics and Resource Assessment of Petrochemical Equipment]. Saint Petersburg, Nedra, 2012. 568 p. [in Russian].

5. Shcherbinskiy V.G., Aleshin N.P. *Ul'trazvukovoy kontrol' svarnykh soedineniy* [Ultrasonic Inspection of Welded Joints]. Moscow, MSTU, 2000. 496 з. [in Russian].

6. Zuev L.B., Semukhin B.S., Bushmeleva K.I. *Izmenenie skorosti ul'trazvuka pri plasticheskoy deformatsii Al* [The Change of ultrasound Velocity During Plastic Deformation, Al]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Applied Physics*, 2000, Vol. 70, Issue 1, pp. 52-56. [in Russian].

7. Fayrushin A.M., Karetnikov D.V., Romanchuk A.S. *Issledovanie vliyaniya vibratsionnoy obrabotki stali 09G2S v protsesse svarki na metalle svarnogo shva* [Investigation of the Effect of Vibration Treatment of Steel 09G2S in the Welding Process on the Weld Metal]. *XI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennye problemy mashinostroeniya»* [XI International Scientific and Technical Conference «Modern Problems of Mechanical Engineering»]. Tomsk, 2017. pp. 50-58. [in Russian].

8. Korobtsov A.S., Rogozin D.V. *Kriterii kachestva ul'trazvukovogo kontrolya svarnykh soedineniy* [Quality Criteria for Ultrasonic Testing of Welded Joints]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Don State Technical University*, 2011, No. 11(10), pp. 1756-1762. [in Russian].

## Сведения об авторах

### About the Authors

Мамлиев Ильнар Радимович, магистрант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Inar R. Mamliiev, Undergraduate Student of the Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: mamlievilnar@mail.ru

Янбарисов Артур Шамилевич, магистрант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Artur Sh. Yanbarisov, Undergraduate Student of the Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: yanbarisov\_artur@mail.ru

Файрушин Айрат Миннуллович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ayrat M. Fairushin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: tna\_ugntu@mail.ru