

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА СНЯТИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

**С.И. Минин, А.И. Трофимов, М.А. Трофимов**

*Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ  
249040, Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д. 1*



Предлагается техническое решение задачи снятия остаточных напряжений, образующихся при сварке циркуляционных трубопроводов АЭС, с помощью ультразвукового устройства. Снятие остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов ультразвуковым устройством в процессе сварки позволяет повысить надежность, увеличить прочностные характеристики. Сварное соединение, обработанное ультразвуком в процессе сварки, имеет мелкозернистую структуру и высокую коррозионную стойкость. Представлена функциональная схема устройства и его конструкция.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, сварка, сварные соединения, ультразвуковой метод снятия напряжений, ультразвук, автоматизированная ультразвуковая система.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности сварных конструкций является одной из важных задач обеспечения безопасности АЭС. Работоспособность сварных конструкций определяется работоспособностью сварного соединения, несущая способность которого значительно уступает несущей способности основного металла. Это связано с термомодеформационными процессами, а также с фазовыми и структурными превращениями при сварке, в результате которых в сварных соединениях образуются остаточные напряжения. Они складываются с напряжениями от внешних нагрузок и являются основной причиной разрушения сварных конструкций [1 – 18].

На кафедре «Автоматика, контроль и диагностика» Обнинского института атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ предложен и разработан ультразвуковой метод снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов и сплавов. Создан опытный образец автоматизированного устройства снятия остаточных напряжений, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА

Для обеспечения эффективного снятия остаточных напряжений необходимо непрерывное воздействие ультразвуком на образец, поэтому в устройстве используются два (~ 3кВт) генератора ультразвука с водным охлаждением. Блок управле-

ния 1, осуществляет управление шаговыми приводами перемещения преобразователей вдоль трубопровода. Блок управления 2 управляет электрическими тормозами, чтобы удерживать преобразователи на трубе между перемещениями; определяет положение сварочного электрода относительно преобразователей с помощью оптических датчиков и передает эту информацию в микроконтроллер блока управления 1 с помощью интерфейса RS485. Кроме того, имеется система визуального контроля положения сварочного аппарата относительно ультразвуковых преобразователей.

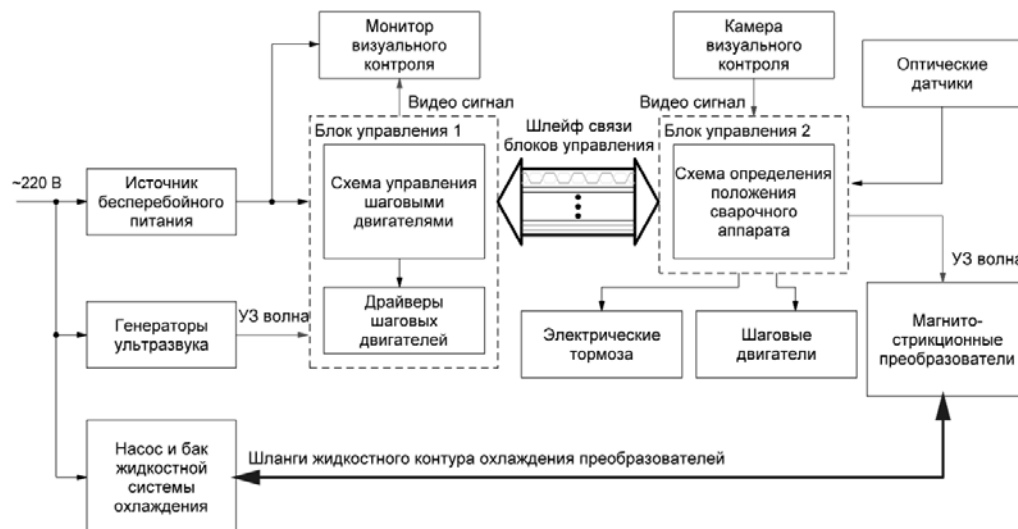


Рис. 1. Функциональная схема устройства

Устройство состоит из следующих функциональных частей.

- Источник бесперебойного питания, обеспечивающий стабилизированное питание наиболее важных частей устройства – блоков управления и визуального контроля.
- Генераторы мощного ультразвука и магнито-стрикционные преобразователи, создающие ультразвуковую волну необходимой мощности. Для правильной работы устройства необходимо непрерывное воздействие ультразвуком на образец, поэтому в устройстве будет использовано два генератора.
- Насос и бак жидкостной системы охлаждения магнито-стрикционных преобразователей. Поскольку для снятия остаточных напряжений требуется высокоэнергетическая волна (3 кВт), то используются относительно громоздкие магнито-стрикционные ультразвуковые преобразователи. Кроме того, они выделяют достаточно много тепловой энергии, которую наиболее эффективно можно отводить с помощью жидкостной системы охлаждения.
- Блок управления 1, осуществляющий управление шаговыми приводами перемещения преобразователей вдоль образца.
- Драйвер управления шаговыми двигателями (составная часть блока управления 1). Микроконтроллер, являющийся основой блока управления 1, не может работать с сигналами выше 5 В. Этого напряжения недостаточно для управления промышленными шаговыми двигателями, которые предполагается использовать для перемещения преобразователей вдоль образца. Поэтому требуется специальная усилительная схема, называемая драйвером.
- Блок управления 2 выполняет следующие функции:
  - управление электрическими тормозами, чтобы удерживать преобразователи на образце между перемещениями;

- определение положения сварочного электрода относительно преобразователей (между преобразователями или нет) с помощью оптических датчиков;
- передача информации о положении сварочного электрода в микроконтроллер блока управления 1 с помощью интерфейса RS485.

• Видеосистема визуального контроля положения сварочного аппарата относительно ультразвуковых преобразователей. Видеосигнал передается по отдельному коаксиальному кабелю.

Механическая конструкция обеспечивает крепление следующих частей устройства:

- ультразвуковых преобразователей к трубопроводу ДУ-300;
- электрических двигателей, перемещающих ультразвуковые преобразователи вдоль сварного шва, а также в направлении к (от) трубе каждого из них;
- прочих частей устройства, расположенных вблизи сварного шва (блока управления 2, камеры визуального контроля и фотодатчиков).

Кроме того конструкция должна отвечать следующим требованиям:

- отсутствие соскальзывания устройства под собственным весом при любом положении трубопровода;
- легкость конструкции и простота установки;
- малые массогабаритные показатели;
- наличие удобных ручек для переноса устройства.

Эскиз механической конструкции приведен на рис. 2.

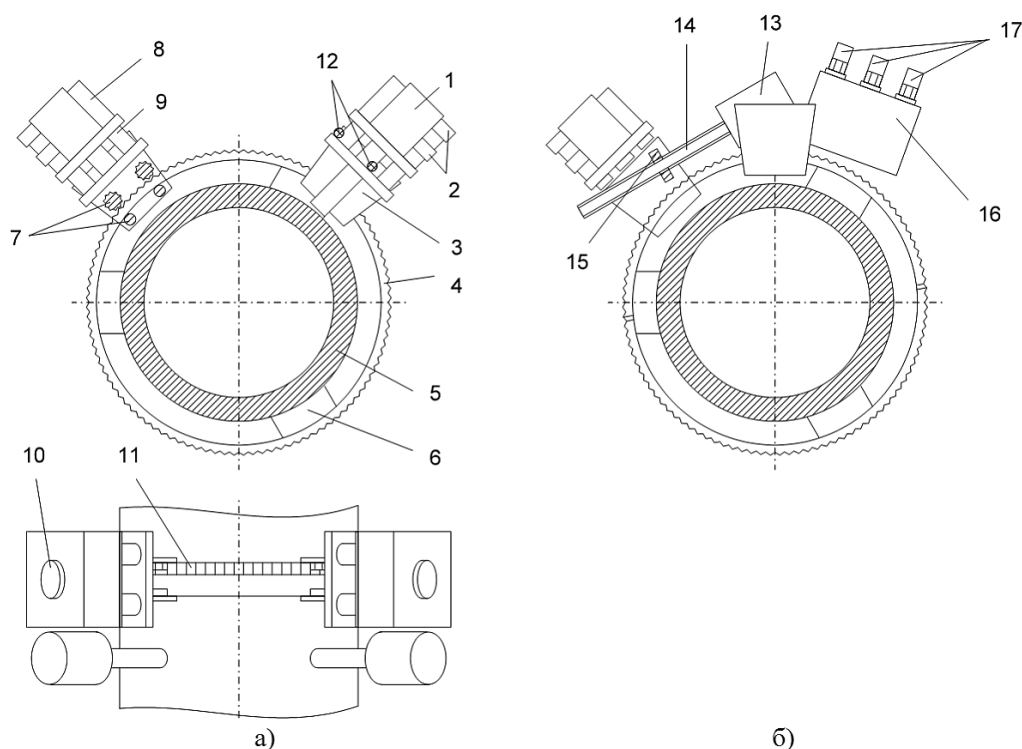


Рис. 2. Эскиз механической конструкции устройства: а) схема перемещения ультразвуковых преобразователей к (от) трубе; б) схема взаимного перемещения ультразвуковых преобразователей

## ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА

Ультразвуковые магнитострикционные преобразователи 1 вместе с шаговым двигателем 8 устанавливаются на крепление 3, свободно перемещающееся вдоль на-

правляющей 4. Направляющие крепятся к свариваемой трубе 5 с помощью трех профилированных под диаметр трубы оснований 6. Шестеренки зубчатой передачи и гладкие колеса 7 перемещаются вдоль направляющей, обеспечивая плавное взаимное перемещение преобразователей. Шаговые двигатели, установленные рядом с каждым из преобразователей, служат для перемещения волноводов преобразователей к (от) свариваемой трубе. Перемещение осуществляется с помощью вала 10. Пара фотодатчиков 12 служат для определения положения сварочной горелки относительно ультразвуковых преобразователей.

Взаимное перемещение ультразвуковых преобразователей осуществляется шаговым двигателем 13 и валом 14, прикрепленным к гайке 15. Вращение вала через зубчатую передачу (не показано) передается к шестеренкам 7 и производит сдвигание или раздвижение преобразователей друг относительно друга. На рисунке 2 б показаны блок управления 16 и его соединительные провода 17.

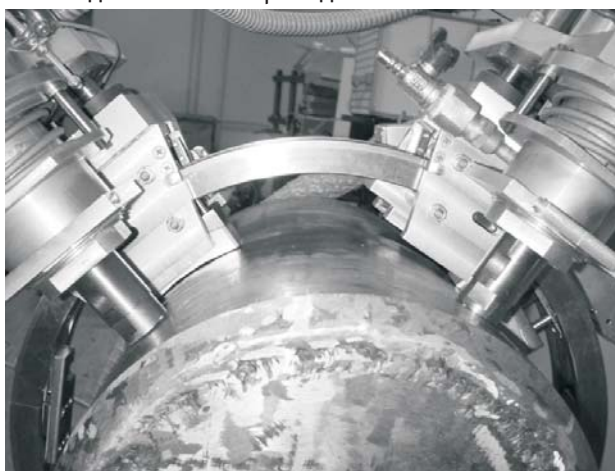


Рис. 3. Механизм устройства ультразвуковой обработки сварных соединений

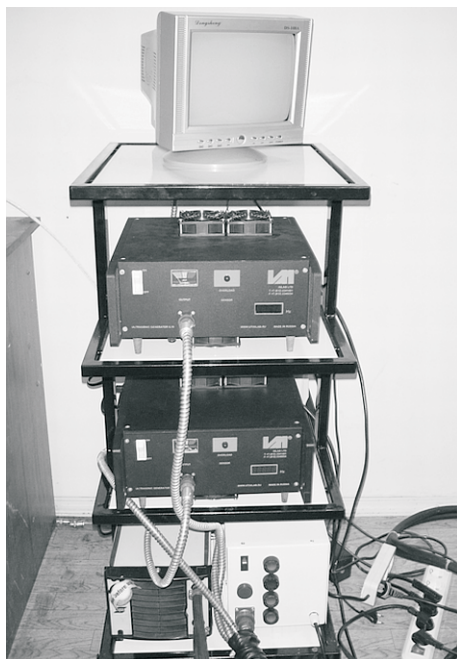


Рис. 4. Приборная стойка устройства

Механизм устройства приведен на рис. 3, а приборная стойка с электронными блоками показана на рис. 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время опытный образец автоматизированной системы снятия остаточных напряжений применяется при сварке циркуляционных трубопроводов на Курской АЭС. В результате ультразвуковой обработки сварных соединений автоматизированной системой снятия остаточных напряжений существенно уменьшаются остаточные сварочные напряжения, повышаются механические прочностные свойства металла сварных соединений циркуляционных трубопроводов АЭС.

## Литература

1. Трофимов А.И. Ультразвуковой метод снятия остаточных напряжений в процессе сварки. – М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. Трофимов А.И., Трофимов М.А., Минин С.И., Кириллов Ю.А. Инновационные ультразвуковые технологии повышения ресурса оборудования АЭС при его изготовлении. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012, – № 2. – С. 48–54.
3. Трофимов А.И. Физические основы ультразвукового метода снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов и сплавов. – М.: Энергоатомиздат, 2009, 239 с.
4. Prokopenko G.I., Lyatun T.A. Study of Surface Hardening Conditions by Means of Ultrasound // Physics and Chemistry of Material Processing. – 1977. – № 3. – P. 91.
5. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Prokopenko G., Mikheev P., Knysh V. Optimum Application of Ultrasonic Peening. SEM Annual Conference and Exposition: Experimental Mechanics in Emerging Technologies. Portland. Oregon. USA, June 4-6, 2001. – PP. 179-182.
6. Pleshanov V.S., Kibitkin V.V., Panin V.E. Mesomechanics and Fatigue Fracture for polycrystals with macroconcentrators. // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 1998. – Vol. 30. – № 1. – PP. 13-18.
7. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
8. Тяпунина Н.А., Благовещенский В.В., Зиненкова Г.М., Ивашкин Ю.А. Особенности пластической деформации под действием ультразвука // Известия вузов. Физика. – 2003. – №6. – С. 118-128.
9. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение. – 1974. – 248 с.
10. Гуца О.И. Анализ неоднородных полей остаточных напряжений в сварных соединениях. // Автоматическая сварка. – 1994. – №7-8. – С. 3-5, 62.
11. Тяпунина Н.А., Наими Е.К., Зиненкова Г.М. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами. – М.: Издательство МГУ. – 1999. – 240 С.
12. Кудрявцев П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. – М.: Машиностроение. – 1964. – 96 с.
13. Кулемин А.В. Ультразвук и диффузия в металлах. – М.: Машиностроение. – 1978. – 200 с.
14. Абрамов О.В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. – М.: Metallurgy. – 1972. – 256 с.
15. Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швигла Ш.А. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение. – 1984. – 280 с.
16. Трофимов А.И., Минин С.И., Трофимов М.А. Методы контроля и снятия напряжений в основном металле и сварных соединений конструкций АЭС. – М.: Энергоатомиздат. – 2005. – 272 с.
17. Fitchard E.E. Randomly simulated borehole tests accuracy of directional survey methods. // Oil and Gas Journal. – 1981 June. – Vol. 79. – № 26. – PP. 140-150.
18. Wolf C.J.M., de Wardt J.P. Borehole Position uncertainty – analysis of measuring methods and derivation of systematic error model. // Journal of Petroleum Technology. – 1981. – Vol. 33. – № 12. – PP. 339-350.

Поступила в редакцию 29.12.2015 г.

**Авторы**

Минин Сергей Иванович, доцент, кандидат техн. наук

E-mail: akid@inbox.ru

Трофимов Адольф Иванович, зав. кафедрой «Автоматика, контроль и диагностика АЭС», профессор, доктор техн. наук

E-mail: atrofimov@obninsk.ru

Трофимов Максим Адольфович, профессор, доктор техн. наук

E-mail: trofimovma@mail.ru

UDC 62-524

**AUTOMATED ULTRASONIC SYSTEM RESIDUAL STRESSES  
IN THE WELDED JOINTS OF THE CIRCULATION PIPE NPP**

Minin S.I., Trofimov A.I., Trofimov M.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering,

National Research Nuclear University «MEPhI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

**ABSTRACT**

Improving the reliability of welded structures is one of the important problems of NPP safety. The performance of welded structures is determined by the performance of the welded connection, the bearing capacity is significantly inferior to the load-bearing capacity of the base metal. This is due to thermal deformation processes, as well as phase and structural transformations in welding, including welds, residual stresses are formed. They are combined with stresses from external loads and are a major cause of destruction of welded constructions.

At the Department «Automation, control and diagnostics» of Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering National Research Nuclear University «MEPhI» proposed and developed an ultrasonic method of relieving residual stresses in welded joints of metals and alloys. The prototype automated device for removing residual stresses. Currently a prototype automated system for removing the residual stress is applied in welding of circulation pipes at Kursk NPP. As a result of ultrasonic treatment of welded joints automated system of removing residual stresses are significantly reduced residual welding stresses, increase the mechanical strength properties of welded connections of circulating pipelines of NPP.

To ensure effective removal of residual stresses must be continuous the effect of ultrasound on the sample, so it uses 2 (~ 3kW) of an ultrasound generator with water cooling. The control unit controls the stepper drives moving the transducers along the pipeline. The control unit controls the electric brakes to hold the transducers on the pipe between movements; determines the position of the welding electrode relative to the converters by means of optical sensors and reports this information to the microcontroller of the control unit 1 via the RS485 interface. In addition, there is a system of visual control of the position of the welding device relative to the ultrasonic transducers.

**Key words:** residual stress, welding, welded joints, the ultrasonic method of stress relief, ultrasound, automated ultrasound system.

**REFERENCES**

1. Trofimov A.I. Method of ultrasonic removal of residual stresses during the welding process. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2008 (in Russian).



2. Trofimov A.I., Trofimov M.A., Minin S.I., Kirillov Y.A. Innovative ultrasonic technology to increase the service life of NPP equipment in its manufacture. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 2, pp. 48-54 (in Russian).
3. Trofimov A.I. Physical principles of ultrasonic methods for relieving residual stresses in welded joints of metals and alloys. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2009. 239 p. (in Russian).
4. Prokopenko, G.I., Lyatun T.A. Study of Surface Hardening Conditions by Means of Ultrasound. *Physics and Chemistry of Material Processing*. 1977, no. 3, p. 91.
5. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Prokopenko G., Mikheev P. and Knysh V. Optimum Application of Ultrasonic Peening. SEM Annual Conference and Exposition: Experimental Mechanics in Emerging Technologies. Portland. Oregon. USA, June 4-6, 2001, pp. 179-182.
6. Pleshanov V.S., Kibitkin V., Panin V.E. Mesomechanics and Fatigue Fracture for polycrystals with macroconcentrators. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1998, v. 30, no. 1, pp. 13-18.
7. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokurov V.A. Welded construction. Strength of welded joints and deformation of structures. Moscow. Vysshaya Shkola Publ., 1982. 272 p. (in Russian).
8. Tyapunina N.A., Annunciation B.V., Zimenkova G.M., Ivashkin Y.A. Features of plastic deformation under the action of ultrasound. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2003, no. 6, pp. 118-128 (in Russian).
9. Sagalevich V.M. Methods of eliminating welding strains and stresses. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1974. 248 p. (in Russian).
10. Gushcha O.I. Analysis of inhomogeneous fields of residual stresses in welded joints. *Automatic welding*. 1994, no. 7-8, pp. 3-5, 62 (in Russian).
11. Tyapunina N.A., Naimi E.K., Zimenkova G.M. Effect of ultrasound on crystals with defects. Moscow. MGU Publ., 1999. 240 p. (in Russian).
12. Kudryavtsev P.I. Residual welding stresses and strength of connections. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1964. 96 p. (in Russian).
13. Kulemin A.V. Ultrasound and diffusion in metals. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1978. 200 p. (in Russian).
14. Abramov O.V. Crystallization of the metals in ultrasonic field. Moscow. Metallurgiya Publ., 1972. 256 p. (in Russian).
15. Abramov O.V., Gorbenko I.G., Svehla S.A. Ultrasonic treatment of materials. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p. (in Russian).
16. Trofimov A.I., Minin S.I., Trofimov M.A. Methods of control and relieve stresses in the base metal and welded joints of NPP designs. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2005. 272 p. (in Russian).
17. Fitchard E.E. Randomly simulated borehole tests accuracy of directional survey methods. *Oil and Gas Journal*. 1981 June, v. 79, no. 26, pp 140-150.
18. Wolf C.J.M., de Wardt J.P. Borehole Position uncertainty-analysis of measuring methods and derivation of systematic error model. *Journal of Petroleum Technology*. 1981, v. 33, no. 12, pp. 339-350.

#### Authors

Minin Sergey Ivanovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: akid@inbox.ru

Trofimov Adol'f Ivanovich, Professor, Head of Department, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: atrofimov@obninsk.ru

Trofimov Maxim Adol'fovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: trofimovma@mail.ru