

## ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СВАРКИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС С ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

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

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



Предложена технология термической сварки циркуляционных трубопроводов АЭС с воздействием ультразвука. Эта технология позволяет значительно увеличить прочность сварного соединения за счет снижения остаточных напряжений, уменьшения размеров зерен и дегазации сварного шва. При воздействии ультразвука увеличивается скорость сварки при уменьшении тока, что приводит к экономии электроэнергии. Технология термической сварки с воздействием ультразвука позволяет отказаться от термоотжига. Структура металла шва, подверженного ультразвуковой обработке в процессе сварки, становится идентичной основному металлу. Применение технологии термической сварки с воздействием ультразвука позволит повысить надежность сварных соединений и увеличить время их эксплуатации. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований воздействий ультразвука на сварной шов и околошовную зону.

**Ключевые слова:** сварка, остаточные напряжения, воздействие ультразвука, околошовная зона.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Несущая способность сварных соединений значительно ниже несущей способности основного металла. Это связано с возникновением в процессе сварки внутренних и остаточных напряжений, которые складываются с эксплуатационными напряжениями, что приводит к разрушению металла сварных соединений.

В настоящее время для снижения остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов и оборудования атомных станций применяется метод термического отпуска и деформационные методы [1, 2].

Термические и деформационные методы позволяют снизить остаточные напряжения в околошовной зоне, но не устраняют структурную нестабильность и физико-химические неоднородности, в результате которых образуются внутренние напряжения в металле сварного шва и микротрещины [3].

### **ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА СВАРОЧНУЮ ВАННУ**

В Обнинском институте атомной энергетики НИЯУ МИФИ разработана технология термической сварки с воздействием ультразвука в процессе сварки, в результате которой структура металла становится мелкозернистой и однородной. Исключаются внут-

© С.И. Минин, А.И. Трофимов, М.А. Трофимов, 2016

рение напряжения, происходит снятие остаточных напряжений в околосшовной зоне. Схема воздействия ультразвука на сварное соединение в процессе сварки приведена на рис. 1. Схема механизма воздействия ультразвука на процесс кристаллизации металла сварного соединения показана на рис. 2.

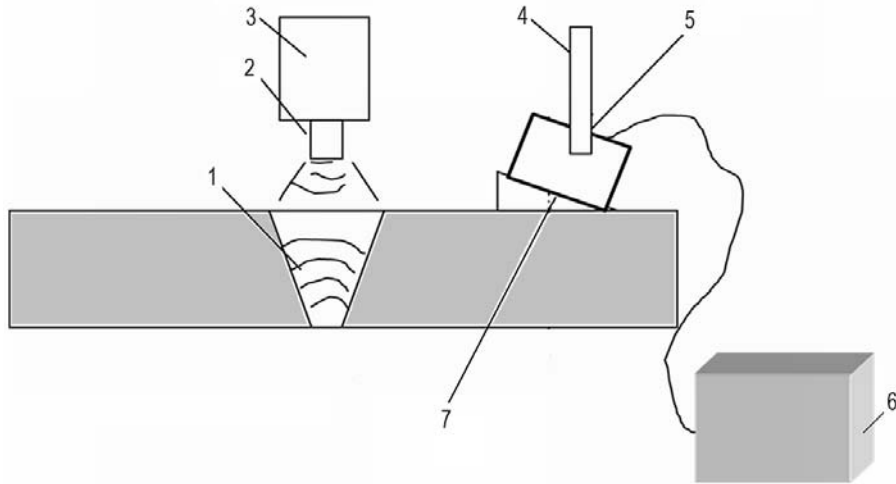


Рис. 1. Схема воздействия ультразвука на сварное соединение в процессе сварки: 1 – сварное соединение; 2 – электрод; 3 – держатель; 4 – кронштейн; 5 – ультразвуковой преобразователь; 6 – ультразвуковой генератор; 7 – призма



Рис. 2. Схема механизма воздействия ультразвука на процесс кристаллизации и дегазации металла

Роль отдельных факторов ультразвукового поля в создании тех или иных структурных изменений в металле зависит от условий кристаллизации. В различных зонах кристаллизующегося расплава может преобладать влияние какого-либо из фак-

торов ультразвукового поля. Так, например, диспергирование кристаллов может происходить в двухфазной зоне, а акустические потоки и перемешивание могут быть только в жидкой фазе. Если уменьшение величины зерна и устранение столбчатой структуры происходят за счет ультразвукового диспергирования, то изменение характера распределения фаз и процесс дендритной ликвидации определяются, главным образом, изменением градиента температур в расплаве и перемешиванием. При этом причинами диспергирования являются кавитация, силы вязкого трения, колебательные и радиационные давления. С этими же параметрами связано увеличение скорости зарождения центров кристаллизации [4 – 7].

Кавитационные явления в расплаве могут возникнуть, если колебательное давление в нем превышает определенную, характерную для данного вещества, величину. В расплавленном металле условия для возникновения и развития кавитационных процессов благоприятны. Одной из причин этого является значительная насыщенность расплавов растворенными газами, способствующая образованию кавитационных пузырьков. Кроме того, вследствие различной растворимости газов в твердой и жидкой фазах на фронте кристаллизации образуется избыток свободного газа, что должно создавать в этой области дополнительный источник кавитационных зародышей и снижать порог кавитации.

При дегазации расплавов в ультразвуковом поле в режиме развитой кавитации в нем протекают следующие процессы: зарождение кавитационных пузырьков; рост пузырьков в результате направленной диффузии из расплава в полость и вынос пузырьков на поверхность расплава [8].

Механизм воздействия ультразвука на околошовную зону заключается в том, что воздействие ультразвука также приводит к повышению внутренней энергии металлов за счет повышения степени возбуждения колебаний решетки, точечных дефектов, дислокаций, как и повышение температуры.

Ниже приведены результаты исследований воздействия ультразвука на процесс сварки сварных соединений оборудования АЭС. В частности, на рис. 3 показана микроструктура аустенитного металла сварного трубопровода Ду 300, полученная как при обычной сварке, так и при сварке, выполненной с помощью автоматизированного устройства ультразвуковой обработки сварных соединений [9].

В настоящее время на АЭС с реакторами РБМК-1000 наиболее проблемными являются сварные соединения циркуляционных трубопроводов Ду 300 мм, на АЭС с реакторами ВВЭР – сварные соединения парогенераторов ПГВ-1000 и ПГВ-440.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Результаты исследований сварных соединений образцов трубопроводов Ду 300 мм, выполненных с воздействием ультразвука, показали, что структура металла сварного соединения становится мелкозернистой и однородной (см. рис. 3). Происходит существенное уменьшение остаточных напряжений и повышение пластических свойств. Относительное удлинение образцов из металла сварного соединения, выполненного с воздействием ультразвука, повысилось в 4,5 раза.

Исследование образцов сварных соединений №111 ПГВ-1000 и №23 ПГВ-440, выполненных с воздействием ультразвука, показали аналогичные результаты. Структура металла сварного соединения после ультразвуковой обработки изменилась и стала мелкозернистой и однородной (рис. 4, 5), уменьшились остаточные напряжения в 2,5 – 3 раза [10].

Для ультразвуковой обработки сварных соединений в процессе сварки в ИАТЭ НИЯУ МИФИ разработано и изготовлено автоматизированное устройство (рис. 6), которое эксплуатируется на АЭС.

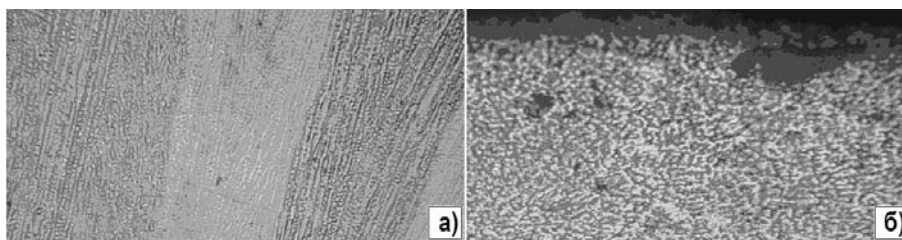


Рис. 3. Микроструктура аустенитного металла сварного шва трубопровода Ду 300 мм (сталь 08X18H10T), полученного а) без воздействия ультразвука; б) с воздействием ультразвука (увеличение 125)

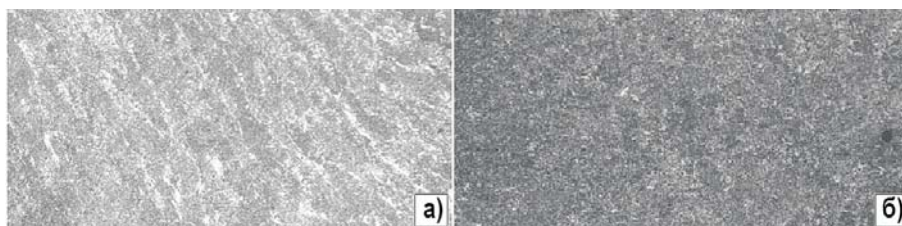


Рис. 4. Микроструктура шва №111 ПГВ-1000М, сформированная а) без воздействия ультразвука; б) с воздействием ультразвука

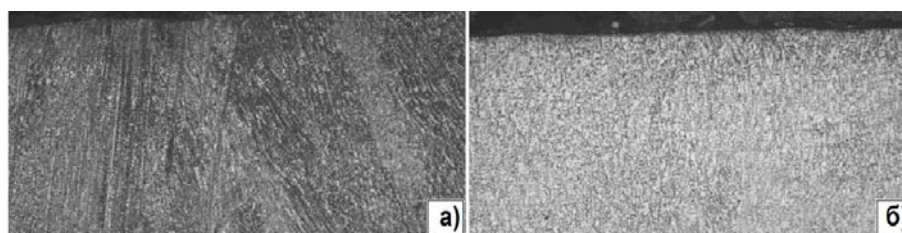


Рис. 5. Микроструктура шва №23, сформированная а) без воздействия ультразвука; б) с воздействием ультразвука

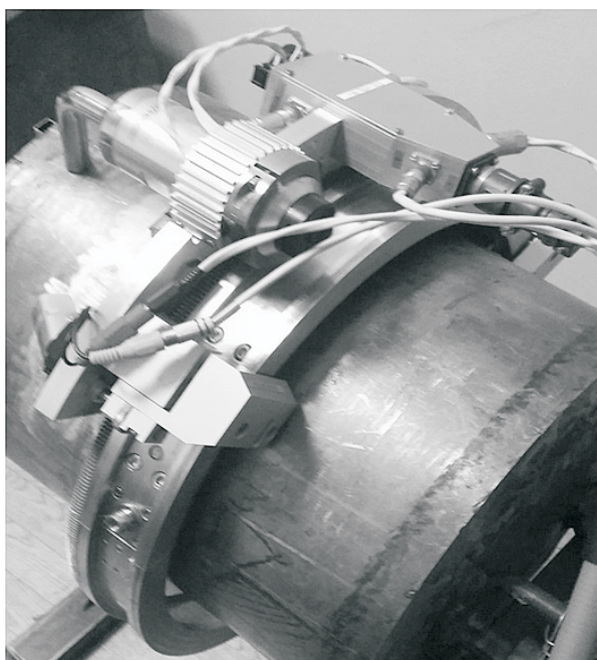


Рис. 6. Внешний вид автоматизированного устройства ультразвуковой обработки сварных соединений в процессе сварки



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковая обработка сварных соединений в процессе сварки оказывает существенное влияние на прочностные характеристики и, соответственно, на ресурс оборудования энергетических объектов. Микроструктура металла в зоне сварного соединения становится мелкозернистой и однородной. Существенно уменьшаются остаточные напряжения. Повышаются механические прочностные свойства металла оборудования АЭС. Ультразвуковая обработка сварных соединений в процессе сварки дополняет послесварочную термообработку изделий из корпусных сталей, применяемых в атомной энергетике.

## Литература

1. Ларионов В.П., Кузьмин В.Р., Слепцов О.И. Хладостойкость материалов и элементов конструкций. Результаты и перспективы. – Новосибирск: Наука. – 2005. – 290 с.
2. Статников Е.Ш., Муктепавел В.О. Технология ультразвуковой ударной обработки как средство повышенной надежности и долговечности сварных металлоконструкций. // Сварочное производство, – 2003. – №4. – С. 25-29.
3. Marushchak P.O., Salo U.V., Bishchak R.T., Poberezhnyi L.Ya. Study of Main Gas Pipeline Steel Strain Hardening After Prolonged Operation. // Chemical and Petroleum Engineering. – May 2014. – Vol. 50. – Issue 1-2. – PP. 58-61.
4. Pleshanov V.S., Kibitkin V.V., Panin V.E. Mesomechanics and Fatigue Fracture for polycrystals with macroconcentrations. // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 1998. – Vol. 30. – №1. – PP. 13-18.
5. Blaha F., Langenecker B. Plastizitätsuntersuchungen von Metallkristallen in Ultraschallfeld // Naturwis. – 1955. – Vol. 20. – №9. – P. 556.
6. 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.
7. 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.
8. Трофимов А.И., Трофимов М.А., Минин С.И. Закономерность изменения величины остаточных напряжений в металлах и сплавах при воздействии ультразвука. Научное открытие. Диплом №375, 2009 г.
9. Трофимов А.И. Физические основы ультразвукового метода снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов и сплавов. – М.: Энергоатомиздат. – 2009. – 239 с.
10. 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.
11. Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швеева Ш.А. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение. – 1984. – 280 с.
12. Абрамов О.В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. – М.: Металлургия. – 1972. – 256 с.
13. Кулемин А.В. Ультразвук и диффузия в металлах. – М.: Машиностроение. – 1978. – 200 с.
14. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение. – 1974. – 248 с.
15. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. – М: Машиностроение. – 1968. – 236 с.
16. Тяпунина Н.А., Наими Е.К., Зиненкова Г.М. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами. – М.: Издательство МГУ. – 1999. – 240 с.
17. Тяпунина Н.А., Благовещенский В.В., Зиненкова Г.М., Ивашкин Ю.А. Особенности пластической деформации под действием ультразвука // Известия вузов. Физика. – 2001. – №6. – С. 118-128.
18. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высшая школа. – 1982. – 272 с.

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 534-16

**THE TECHNOLOGY OF THERMAL WELDING OF THE CIRCULATION PIPING OF NPPS CONTAINING THE INFLUENCE OF ULTRASOUND**

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

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

The proposed technology is applicable to thermal welding of the NPP circulation piping using ultrasonics. This technology makes it possible to considerably increase the weld strength by reducing the residual stresses, reduce the grain size and weld degassing. Ultrasonic treatment increases the rate of welding current reduction resulting in electricity saving. The results of theoretical and experimental studies reveal the ultrasonic effects on the weld bead and heat-affected zone (HAZ).

It is known that the bearing capacity of welded joints is considerably lower than that of the base metal. This is due to the welding process, internal and residual stresses formed at operating voltages, which leads to the destruction of metal of welded joints. Currently, residual stresses in welded connections of circulating pipelines and NPP equipment are reduced by the thermal tempering and deformation methods.

The thermal and deformation methods can reduce residual stresses in the HAZ but do not eliminate the structural instability and physical or chemical heterogeneity, resulting in the formation of internal stresses in the weld metal and microcracks.

The specialists of the Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering developed the technology of ultrasonic and thermal welding, in which the metal structure becomes fine-grained and homogeneous, internal stresses are eliminated and residual stresses within the HAZ are removed.

The role of individual ultrasonic factors in the creation of certain structural changes in the metal depends on the crystallization conditions. The effects of any of the ultrasonic factors may dominate in different areas of the crystallizing melt. For example, the dispersion of crystals can occur in the mushy zone whereas acoustic flows and mixing can take place only in the liquid phase. If the grain size reduction and the columnar structure elimination are due to the ultrasonic dispersion, the phase distribution changes and the dendritic elimination process are determined mainly by the temperature gradient changes in the melt and stirring. The dispersion is caused by the cavitation, viscous friction forces as well as oscillatory and radiation pressure. The same parameters determine the increase in the nucleation rate of crystallization centers.

**Key words:** welding, residual stresses, influence of ultrasound, heat-affected zone.

## REFERENCES

1. Larionov V.P., Kuzmin V.R., Sleptsov O.I. Cold resistance of materials and structural elements. Results and prospects. Novosibirsk. Nauka Publ., 2005, 290 p. (in Russian).
2. Statnikov E.S., Muktupavels V.O. The technology of ultrasonic impact treatment as a means of increased reliability and durability of welded metal structures. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2003, no. 4, pp. 25-29 (in Russian).
3. Marushchak P.O., Salo U.V., Bishchak R.T., Poberezhnyi L.Ya. Study of Main Gas Pipeline Steel Strain Hardening After Prolonged Operation. *Chemical and Petroleum Engineering*. May 2014, v. 50, iss. 1-2, pp. 58-61.
4. Pleshanov V.S., Kibitkin V.V., Panin V.E. Mesomechanics and Fatigue Fracture for polycrystals with macroconcentrations. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1998, v. 30, no. 1, pp. 13-18.
5. Blaha F., Langenecker B. Plastizitätsuntersuchungen von Metallkristallen in Ultraschallfeld. *Naturwis*, 1955, v. 20, no. 9, p. 556.
6. 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.
7. 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.
8. Trofimov A.I., Trofimov M.A., Minin S.I. The pattern of change in the magnitude of residual stresses in metals and alloys when exposed to ultrasound. Scientific discovery. Diploma № 375, 2009 (in Russian).
9. 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).
10. 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).
11. Abramov O.V., Gorbenko I.G., Svehla S.A. Ultrasonic treatment of materials. Moscow. Mashinostroenie Publ, 1984. 280 p. (in Russian).
12. Abramov O.V. Crystallization of the metals in ultrasonic field. Moscow. Metallurgy Publ., 1972. 256 p. (in Russian).
13. Kulemin A.V. Ultrasound and diffusion in metals. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1978. 200 p. (in Russian).
14. Sagalevich V.M. Methods of eliminating welding strains and stresses. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1974. 248 p. (in Russian).
15. Vinokurov V.A. Welding deformation and stress. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1968. 236 p. (in Russian).
16. Tyapunina N.A., Naimi E.K., Zimenkova G.M. The Effect of Ultrasound on Crystals with Defects. Moscow. MGU Publ., 1999. 240 p. (in Russian).
17. Tyapunina N.A., Annunziata B.V., Zimenkova G.M., Ivashkin Y.A. Features of plastic deformation under the action of ultrasound. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2001, no. 6, pp. 118-128 (in Russian).
18. 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).

**Authors**

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

E-mail: [akid@inbox.ru](mailto:akid@inbox.ru)

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

E-mail: [atrofimov@obninsk.ru](mailto:atrofimov@obninsk.ru)

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

E-mail: [trofimovma@mail.ru](mailto:trofimovma@mail.ru)