

УДК 621.791

## ИННОВАЦИОННАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

А.И. Трофимов<sup>1</sup>, С.И. Минин<sup>1</sup>,  
М.А. Трофимов<sup>1</sup>, Ю.А. Кириллов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ»  
Обнинский институт атомной  
энергетики

<sup>2</sup>ЗАО «ПЕТРОЗАВОДСКАМШ»

Предложена инновационная технология термической сварки трубопроводов и трубопроводной арматуры с воздействием ультразвука. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований воздействий ультразвука на сварной шов и околошовную зону.

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

Мировой опыт показывает, что ресурс оборудования атомных станций определяется главным образом ресурсом сварных соединений. 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.

Образование остаточных напряжений в процессе сварки происходит по следующим причинам:

1. Термодформационные процессы, которые создают остаточные напряжения в околошовной зоне сварного соединения.

2. Физико-химические процессы. В процессе кристаллизации в металле образуются физические и химические неоднородности, которые являются источниками внутренних напряжений.

3. Образование столбчатых кристаллов, на границах которых могут возникать микротрещины. Кроме того, снижается стойкость к межкристаллитной коррозии.

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

## THE INNOVATIVE ULTRASONIC TECHNOLOGY OF LIFE INCREASE OF NPP EQUIPMENT

A.I. TROFIMOV, S.I. MININ,  
M.A. TROFIMOV, Y.A. KIRILLOV

Proposed innovative technology for thermal welding pipelines and valves with sonication. The results of theoretical and experimental studies of ultrasound to weld and heat affected zone.

**KEYWORDS:** welding, residual stresses, the effects of ultrasound, heat-affected zone.

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.

В Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ разработана технология дуговой сварки с воздействием ультразвука в процессе сварки, в результате которой структура металла становится мелкозернистой и однородной. Исключаются внутренние напряжения, происходит снятие остаточных напряжений в околошовной зоне [1,2]. Схема воздействия ультразвука на сварное соединение в процессе сварки приведена на рис. 1.

Схема механизма воздействия ультразвука на процесс кристаллизации металла сварного соединения приведена на рис. 2.

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 факторов 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

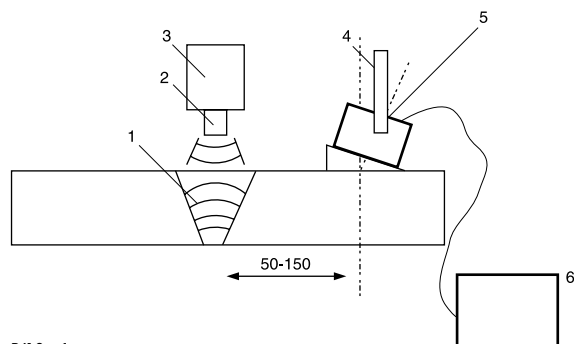


Рис. 1.

Схема воздействия ультразвука на сварное соединение в процессе сварки: 1 – сварное соединение, 2 – электрод, 3 – держатель, 4 – кронштейн, 5 – ультразвуковой преобразователь, 6 – ультразвуковой генератор

устранение столбчатой структуры происходит 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.

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.

Механизм воздействия ультразвука на околошовную зону заключается в следующем. Введение ультразвуковых колебаний в металл необходимо рассматривать как изменение состояния металла при повышении температуры. Воздействие ультразвука так же приводит к повышению внутренней энергии металла за счет повышения степени возбуждения колебаний решетки, точечных дефектов, дислокаций.

Эксперименты, проведенные на образцах из алюминия показали, что предел текучести металла образцов из алюминия наступает при интенсивности ультразвуковых колебаний 50 Вт/см<sup>2</sup>. Аналогичное состояние

наступает при нагреве до 600 град. Цельсия. При этом плотность акустической энергии – 10<sup>15</sup> эВ/см<sup>3</sup>, плотность тепловой энергии – 10<sup>22</sup> эВ/см<sup>3</sup>. Этот физический эффект объясняется тем, что тепловая энергия поглощается всем объемом металла, ультразвуковая – главным образом дислокациями и границами зерен, определяющими процесс пластичности.

Ниже приведены результаты исследований воздействия ультразвука на процесс сварки сварных соединений оборудования АЭС.

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.

Анализ результатов исследования причин образования трещиновидных дефектов в сварных соединениях трубопроводов Ду 300 мм, выполненных из стали аустенитного класса 08X18H10T показал, что образование и развитие трещиновидных дефектов происходит по механизму межкристаллитного растрескивания вследствие наличия значительных остаточных напряжений и структурных неоднородностей металла сварных соединений.

Результаты исследований сварных соединений образцов трубопроводов Ду 300 мм, выполненных с воздействием ультразвука, показали, что структура металла сварного соединения становится мелкозернистой и однородной (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 (рис. 4, рис. 5).

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. 6, рис. 7), уменьшились остаточные напряжения в 2,5–3 раза.

Проведены исследования образцов сварных соединений труб большого диаметра, изготовленных из сталей 13Г1С-У, выполненных с воздействием ультразвука в ОАО «Челябинский трубопрокатный завод». Результаты исследований показали, что воздействие ультразвука приводит к изменению структуры металла сварного соединения (рис. 8) и существенному повышению его механических свойств. Ударный изгиб образцов, сваренных с воздействием ультразвука, происходит при напряжениях в 5,3 раза выше, чем образцов, сваренных без воздействия ультразвука.

Кроме того, при воздействии ультразвука в процессе сварки исключаются непровары (рис. 9).

Разработаны также технологии ультразвуковой обработки металла в процессе наплавки трубопроводов (рис. 10) и трубопроводной арматуры (рис. 11), в ре-

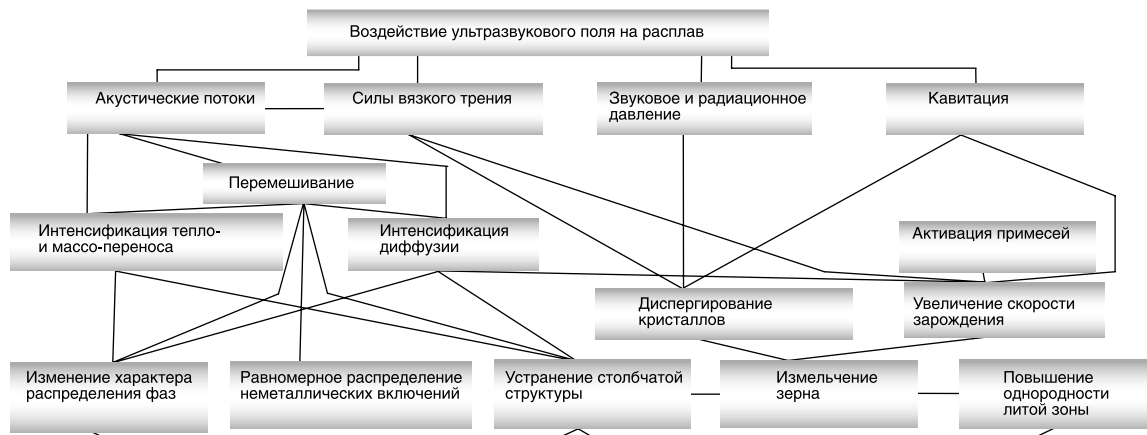


Рис. 2.

Схема механизма воздействия ультразвука на процесс кристаллизации и дегазации металла

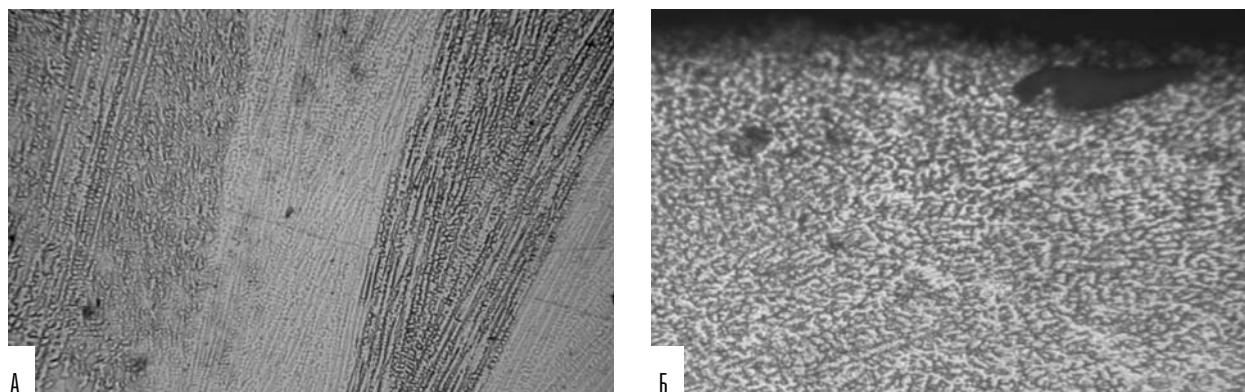


Рис. 3.

Микроструктура аустенитного металла сварного шва трубопровода Ду 300 мм (сталь 08Х18Н10Т), полученного: А – без воздействия ультразвука, Б – с воздействием ультразвука (увеличение 125\*)

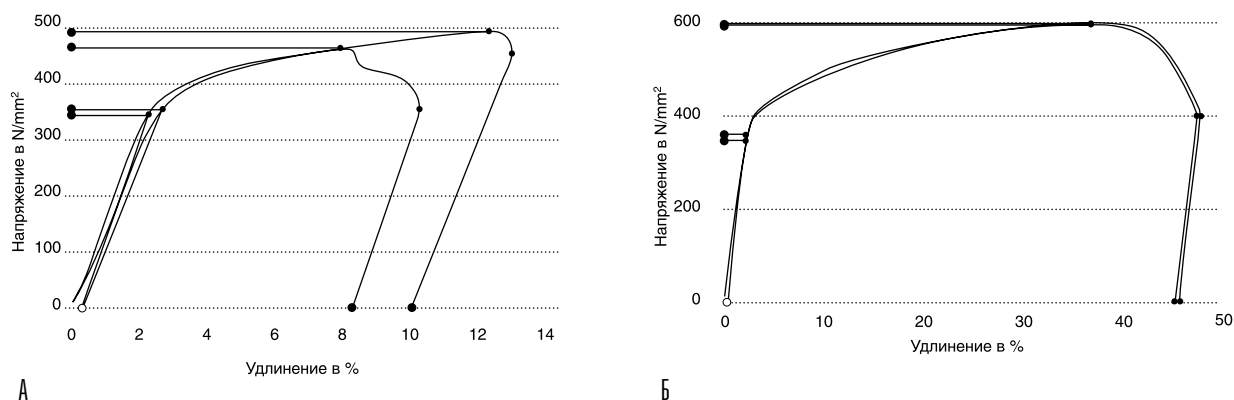


Рис. 4.

Характеристики деформирования образцов, вырезанных из металла шва, сваренного: а) без применения УЗ обработки, б) с применением УЗ обработки

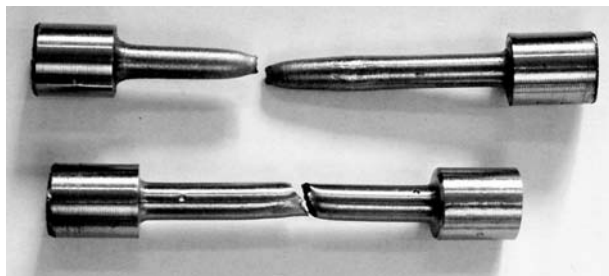


Рис. 5.

Внешний вид образцов после испытаний. Верхний образец вырезан из трубы с применением ультразвуковой обработки, нижний из трубы, сваренной по штатной технологии без ультразвуковой обработки

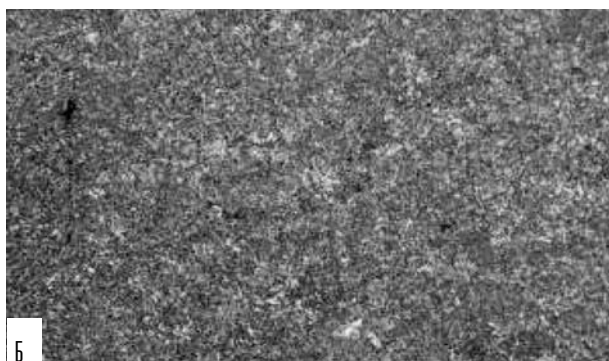
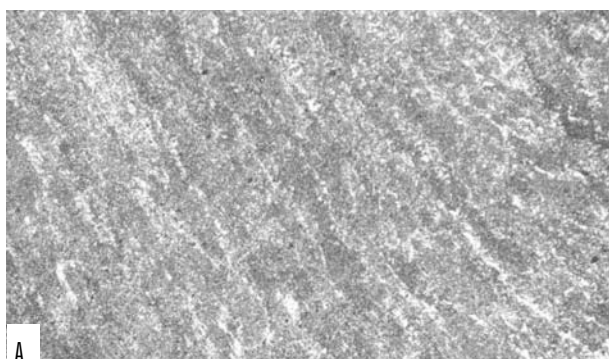


Рис. 6.

Микроструктура шва №111 ПГВ-1000М сформированная: А – без воздействия ультразвука, Б – с воздействием ультразвука

зультате которых существенно повышаются качество наплавки и, соответственно, ресурс плакированных трубопроводов и трубопроводной арматуры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковая обработка сварных соединений в процессе сварки и в процессе наплавки оказывает существенное влияние на прочностные характеристики и, соответственно, на ресурс оборудования энергетических объектов, микроструктура металла в зоне сварного соединения становится мелкозернистой и

А.И. ТРОФИМОВ, С.И. МИНИН,  
М.А. ТРОФИМОВ, Ю.А. КИРИЛЛОВ  
ИННОВАЦИОННАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

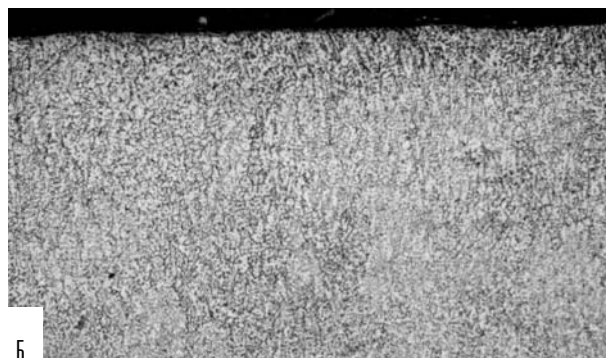
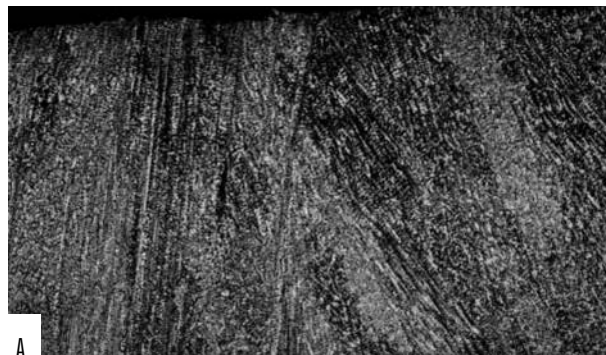


Рис. 7.

Микроструктура шва №23 сформированная: А – без воздействия ультразвука, Б – с воздействием ультразвука

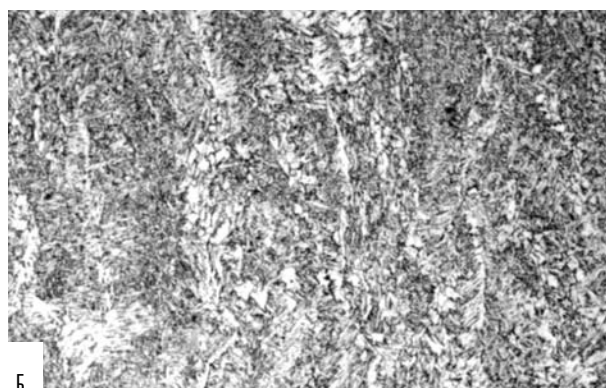


Рис. 8.

Микроструктура шва трубы 13Г1С-У, сформированная: А – без воздействия ультразвука, Б – с воздействием ультразвука

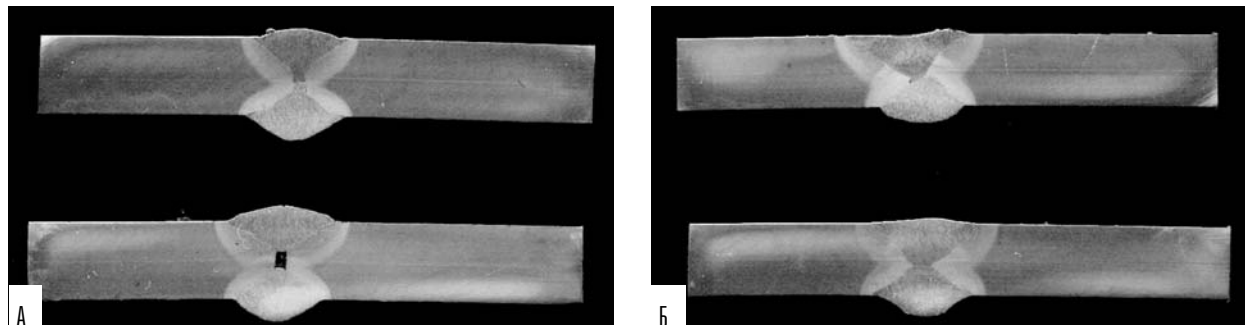


Рис. 9.

Микрошлифы сварных соединений стали 12Г1С-У, полученных: А – без воздействия ультразвука, Б – с воздействием ультразвука

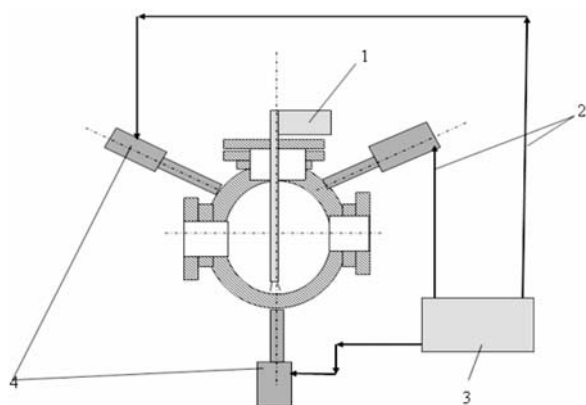


Рис. 10.

Схема устройства ультразвуковой обработки наплавки трубопроводной арматуры: 1 – сварочный автомат, 2 – линии связи, 3 – блок ультразвуковых генераторов, 4 – блок ультразвуковых генераторов

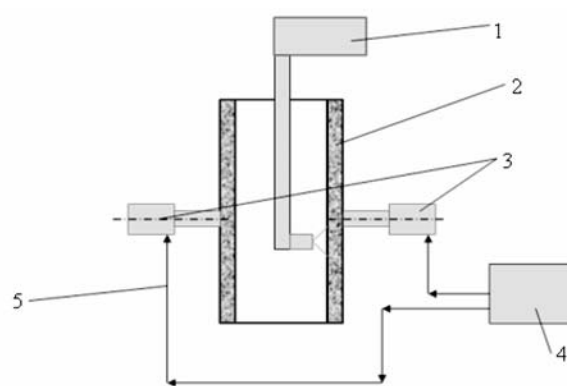


Рис. 11.

Схема устройства ультразвуковой обработки наплавки трубопровода: 1 – сварочный автомат, 2 – труба, 3 – ультразвуковые преобразователи, 4 – блок ультразвуковых генераторов, 5 – линии связи

однородной. Существенно уменьшаются остаточные напряжения. Повышаются механические прочностные свойства металла оборудования АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Трофимов А.И. Физические основы ультразвукового метода снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 2009. 239 с.

Трофимов Адольф Иванович.

д.т.н., профессор, зав. кафедрой автоматки, контроля и диагностики ИАТЭ НИЯУ «МИФИ»,  
☎ тел.: +7 (910) 528-12-55, e-mail: i.e.trofimova@iate.obninsk.ru

Минин Сергей Иванович.

к.т.н., доцент, кафедра АКид ИАТЭ НИЯУ «МИФИ»,  
☎ тел.: +7 (910) 540-00-45, e-mail: akid@inbox.ru

Трофимов Максим Адольфович.

д.т.н., профессор, кафедры автоматки, контроля и диагностики ИАТЭ НИЯУ «МИФИ»,  
☎ тел.: +7 (903) 635-91-43, e-mail: trofimovma@mail.ru

☎ 249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1