

ТЕРМИЧЕСКАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВОЙ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ОПАЛУБКИ, ПРИМЕНЯЕМОЙ НА СТРОИТЕЛЬСТВЕ АЭС, С ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

С.И. Минин

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



Важной задачей в сварочном производстве является повышение прочности, надежности и долговечности сварных конструкций. Существенное влияние оказывают остаточные напряжения. Неравномерный разогрев изделия при сварке порождает его неравномерную температурную деформацию. Монолитность материала изделия препятствует свободной температурной деформации отдельных его частей, в результате чего во время сварки образуются напряжения и пластическая деформация части металла соединения, а после охлаждения в изделии остаются сварочные напряжения и деформации.

Предложена термическая сварка алюминиевой скользящей опалубки, применяемой на строительстве АЭС, с воздействием ультразвука. При ультразвуковой обработке в процессе сварки алюминиевых швов скользящей опалубки значительно увеличивается прочность сварного соединения за счет снижения остаточных напряжений, уменьшения размеров зерен и дегазации сварного шва. Структура металла алюминиевого шва и его свойства становятся идентичными основному металлу. Термическая сварка алюминиевой скользящей опалубки 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: алюминиевый сплав, сварка, остаточные напряжения, воздействие ультразвука, околошовная зона.

ВВЕДЕНИЕ

Причиной остаточных напряжений являются неодинаковые линейные или объемные деформации соседних объемов металла, для которых характерно то, что они существуют внутри конструкции (изделия) без приложения внешних усилий. Различия остаточных напряжений, возникающих при разных технологических процессах, проявляются в характере их распространения по макро- и микрообъемам изделия, а также в конкретных факторах, приводящих к неоднородным деформациям.

Если в процессе нагрева и остывания возникают временные температурные напряжения, которые не превосходят предел текучести материала, то после остыва-

© С.И. Минин, 2017

ния изделия температурные напряжения исчезают. Если же в процессе нагрева или остывания временные температурные напряжения достигают предела текучести, появляются пластические деформации, и после полного остывания в изделии будут существовать остаточные напряжения.

В кристаллах металла есть дефекты, т.е. отклонения от идеального порядка атомной структуры. Любой кристалл заполнен дефектами различных видов, понижающими его прочность. Если приложить к кристаллу внешнюю силу, то его дефекты и прежде всего дислокации начнут двигаться по кристаллу. По мере того, как растет деформация кристалла, увеличивается и число дислокаций в нем.

Для зарождения трещины необходим соответствующий концентратор напряжений, т.е. серия дислокаций, скопившихся у жесткого барьера (например, инородного включения – карбида, оксида и пр.). При этом работу разрушения задают, по крайней мере, два параметра: напряжение массового рождения пор на включениях и деформация до их слияния. То и другое определяют инородные включения [1 – 5]. Они трудноизмеримы (потому что их мало) и трудноконтролируемы в технологии (потому что примеси неизбежны по способу получения материала, а по размерам инициирующие дефекты недоступны традиционным методам дефектоскопии). Конструкций без дефектов не бывает. Поэтому один из путей повышения надежности металлических конструкций состоял в том, чтобы узнать, при каких размерах дефекта (предельные деформации) и вязкости (работа разрушения) сплавов следует прекратить эксплуатацию конструкции. Это путь повышения достоверности результатов расчета.

Коль скоро для зарождения трещины необходим соответствующий концентратор напряжений, т.е. серия дислокаций, скопившихся у жесткого барьера, то можно физическими методами на реальной конструкции ликвидировать этот самый концентратор, например, принудительно снизив концентрацию дислокаций. Например, высокоэффективное снижение (на 50 – 70%) остаточных напряжений в сварных и литых металлоконструкциях и структурное упрочнение металла сварного соединения возможно путем обработки металлических конструкций многократными импульсами давления, генерируемыми высоковольтными электрическими разрядами в воде, различными способами термической обработки.

Природа этих способов имеет общую основу. Дело в том, что каждая дислокационная субструктура всегда стремится к некоторому устойчивому состоянию, характеризующемуся определенным энергетическим уровнем. Для перехода барьера из одного энергетического уровня к новому субструктура должна получить некоторую долю энергии от внешнего источника. Такими источниками являются либо поля импульсных механических воздействий (ударов), либо поля термонапряжений, либо кванты энергии мощной ультразвуковой волны. В силу высокой проникающей способности ультразвуковых колебаний, возможности управления их параметрами (амплитудой и частотой) именно ультразвуковые методы имеют перспективы развития в задачах управляемого снятия механических напряжений.

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ

При воздействии гармонически изменяющейся во времени нагрузки, согласно [6], дислокационные сегменты должны совершать вынужденные колебания. В реальных условиях следует учитывать существование, кроме знакопеременного, еще стартового и неоднородных по пространству внутренних напряжений. Последние могут зависеть и от времени, так как под действием ультразвука изменяется взаимное расположение дефектов. При совместном действии ультразвука и постоянного напряжения может иметь место не только периодическое,

но и поступательное движение дислокаций, приводящее к их перераспределению в объеме кристалла.

Смещение u дислокации под действием ультразвука можно рассчитать для единицы длины дислокации, используя уравнение движения дислокации в вязкой среде:

$$B \cdot du/dt = F(t) + F(r,t) + F_{\text{CT}} \text{sign}[F(t) + F(r, t)]. \quad (1)$$

Здесь B – коэффициент динамического торможения; $F(t) = b\sigma(t)$ – сила, действующая на дислокацию, обусловленная ультразвуковым полем $\sigma(t) = \sigma^0 \cdot \sin \omega t$; $F_{\text{CT}} = b\tau^{\text{CT}}$ – сила, при достижении которой начинается движение дислокаций (τ^{CT} – стартовое напряжение). Силу F_{CT} можно рассматривать как силу сухого трения или как обобщенную силу Пайерлса-Набарро. Функция $F(r, t)$ определяется полем внутренних напряжений и обусловлена только взаимодействием дислокаций. Уравнение (1) нелинейно.

Таким образом, воздействие ультразвука приводит к образованию стабильных дислокационных конфигураций, так что его действие оказывается аналогичным отжигу [6].

При воздействии ультразвуковых колебаний на кристаллизующийся металл происходят структурные изменения в металле, определяющиеся процессами, протекающими в расплаве и двухфазной зоне, – зарождением кристаллов, их диспергированием, процессами перемешивания, которые происходят в результате кавитации и акустических потоков в расплаве [6].

При воздействии ультразвука центры кристаллизации возникают мгновенно, и весь образец закристаллизовывается. Эффект увеличения скорости зарождения и роста кристаллов наблюдается при наложении слабого ультразвукового поля. При увеличении интенсивности колебаний происходит диспергирование кристаллов. Помещенный в переохлажденный раствор кристалл распадается на мелкие частицы, которые разносятся по всему объему раствора и в нем возникает множество кристаллов. Диспергирование кристаллов приводит к измельчению структуры первичной кристаллизации.

В процессе колебательного движения атомы кристаллической решетки сталкиваются с соседними атомами, передавая им часть энергии колебания. Особенность колебательного процесса состоит в том, что в среде происходит движение с передачей энергии, тогда как атомы среды постоянно совершают лишь колебательное движение относительно своего фиксированного положения равновесия.

В Обнинском ИАТЭ НИЯУ «МИФИ» разработана технология термической 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 [7 – 17].

Проведены экспериментальные исследования ультразвуковой обработки сварных соединений алюминиевого сплава АД31. На рисунке 1 показаны шлифы сварного шва алюминиевого сплава АД31, сваренного без воздействия и с воздействием ультразвука.

Как видно из рисунка, размер зерен у сварного соединения алюминиевого сплава АД31, сваренного с применением ультразвука, значительно меньше размера зерен металла сварного соединения, сваренного без применения ультразвука.

Для сравнения прочности сварных соединений, сделанных без применения ультразвука и с его применением, были проведены испытания образцов толщиной 5 мм и шириной 40 мм из алюминиевого сплава АД31 на разрыв.

Испытания проводились на машине Instron-4483 (рис. 2).

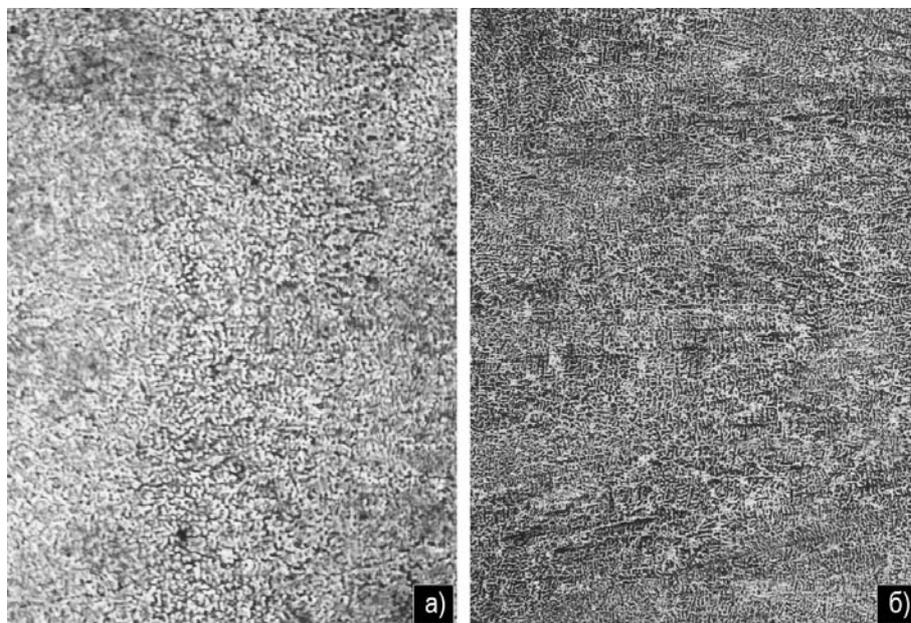


Рис. 1. Шлифы сварного шва алюминиевого сплава АД31: а) – без воздействия ультразвука; б) – с воздействием ультразвука (x100)

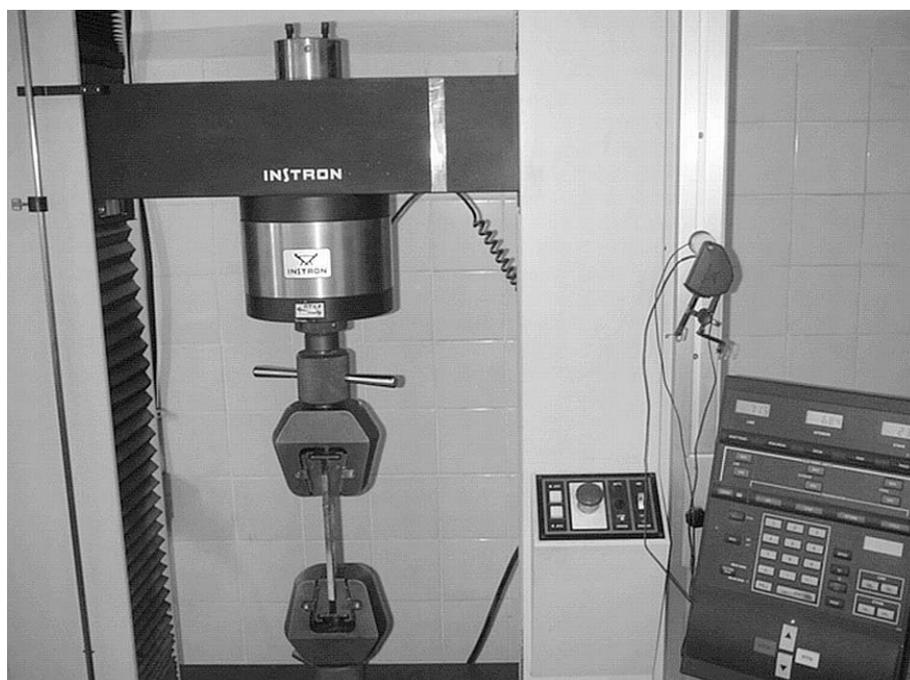


Рис. 2. Внешний вид машины «Instron-4483»

При сварочном токе 100 А получены результаты, приведенные на рис. 3.

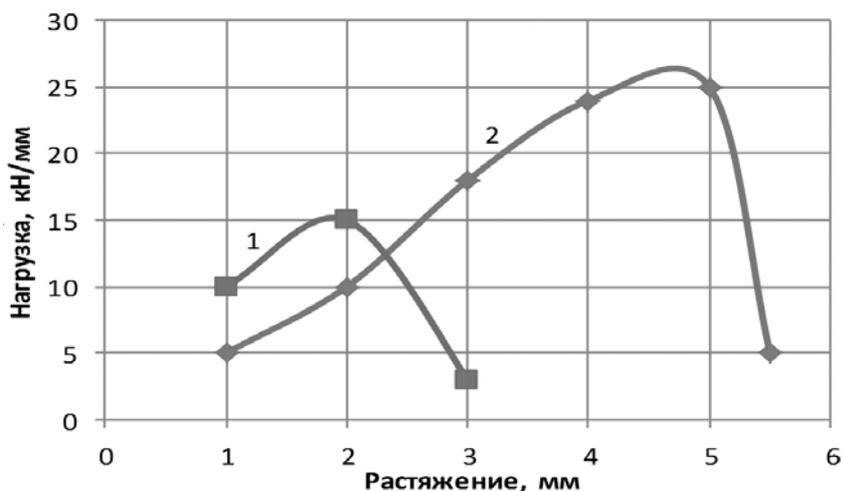


Рис. 3. Характеристики зависимости приложенной нагрузки от растяжения для сварного соединения из сплава АД31: 1 – без применения ультразвука, 2 – с применением ультразвука. Сварочный ток 100 А

На образцах из сплава АД31, сваренных при токе 80 А, получены результаты, приведенные на рис. 4.

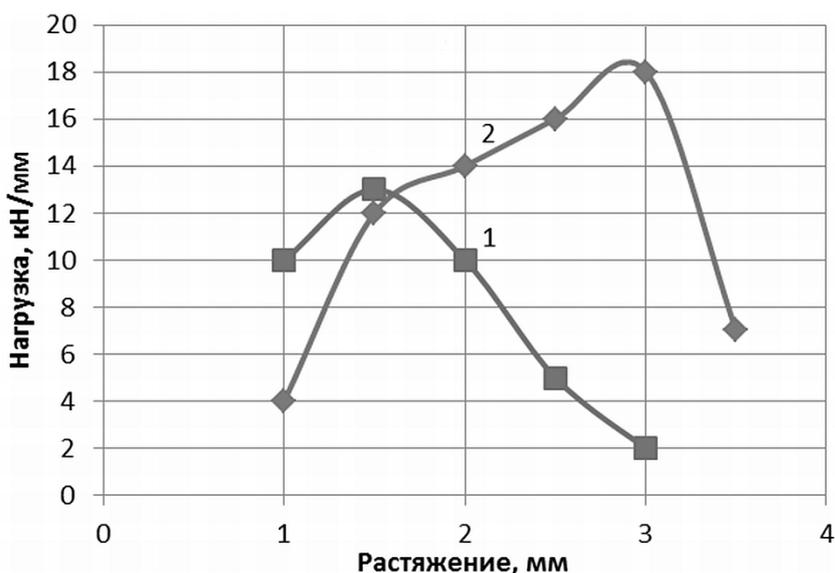


Рис. 4. Характеристики зависимости приложенной нагрузки от растяжения для сварного соединения из сплава АД31: 1 – без применения ультразвука, 2 – с применением ультразвука. Сварочный ток 80 А

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования показали, что при воздействии ультразвука в процессе сварки образцов из сплава АД31 структура металла в сварных швах и околошовной зоне становится мелкозернистой и однородной. При этом повышаются прочностные характеристики сварного соединения сплава АД31, исключается образование концентраторов напряжений и существенно уменьшается вероятность появления несплошностей.

Результаты испытаний образцов на разрыв показали увеличение прочности сварного соединения на 50 – 70%.

Ультразвуковая обработка сварных соединений алюминиевой скользящей опалубки дает возможность повышения срока ее эксплуатации, что позволит снизить стоимость строительных работ на АЭС.

Литература

1. *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.
2. *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. – Iss. 1-2. – PP. 58-61
3. *Pleshakov V.S., Kibitkin V.V., Panin V.E.* Mesomechanics and Fatigue Fracture for polycrystals with macroconcentrations. // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 1998. – Vol. 30. – No. 1. – PP. 13-18.
4. *Blaha F., Langenecker B.* // Naturwis. – 1955. – Vol. 20. – No. 9. – P. 556.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *Трофимов А. И.* Физические основы ультразвукового метода снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов и сплавов. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 239 с.
9. *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.
10. *Ларионов В.П., Кузьмин В.Р., Слепцов О.И.* Хладостойкость материалов и элементов конструкций. Результаты и перспективы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 290 с.
11. *Трофимов А.И., Минин С.И., Трофимов М.А., Васильковский Д.В., Косырев К.А.* Автоматизированная ультразвуковая система снятия остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов АЭС // Вестник Российской академии естественных наук. – 2015. – №1. – С. 3-5.
12. *Трофимов А.И., Минин С.И., Трофимов М.А.* Автоматизированная ультразвуковая система снятия остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 3. – С. 13-19.
13. *Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швецла Ш.А.* Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
14. *Абрамов О.В.* Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. – М.: Metallurgia, 1972. – 256 с.
15. *Кулемин А.В.* Ультразвук и диффузия в металлах. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
16. *Кудрявцев П.И.* Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. – М.: Машиностроение, 1964. – 96 с.
17. *Трофимов А.И., Минин С.И., Трофимов М.А.* Автоматизированная ультразвуковая система снятия остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 3. – С.13-19.

Поступила в редакцию 09.03.2016 г.

Автор

Минин Сергей Иванович, доцент, канд. техн. наук
E-mail: akid@inbox.ru

TECHNOLOGY OF THERMAL WELDING WITH ULTRASONIC WELD JOINT TREATMENT AS APPLIED TO NPP FORMWORKS

Minin S.I.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU «MEPhI»
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

Increasing the strength, reliability and durability of welded structures is an important problem in welding engineering. A significant influence is exerted by residual stresses. Uneven heating of the product during welding causes its uneven temperature deformation. The product material solidity prevents the free temperature deformation of its individual parts, resulting in the formation of stresses and plastic deformation of some parts of the joint metal during welding, and after cooling, welding stresses and deformations remain in the product.

Residual stresses are caused by different linear or volumetric deformations of the adjacent metal masses; these deformations are formed in structures (products) without external forces. The differences of residual stresses which arise during various technological processes are manifested in the character of their distribution in macro- and micro-volumes of the product as well as in the specific factors leading to heterogeneous deformations.

The paper describes an innovative technology of thermal welding with ultrasonic weld joint treatment as applied to aluminum sliding formworks used in NPP construction. Ultrasonic treatment in the process of welding greatly increases the strength of formwork weld joints by reducing their residual stresses, grain size and degassing. The structure and properties of aluminum welds become identical to the base metal. Thermal welding with ultrasonic weld joint treatment will improve the reliability of welded joints and increase their time in service. The results of theoretical and experimental studies are presented relating to the ultrasonic effects on the weld joints and heat-affected zone. The influence of ultrasound during the welding process improves the strength characteristics of alloy AD31 weld joints, prevents the formation of stress concentrators and significantly reduces the likelihood of discontinuities in weld joints.

Key words: aluminum alloy, welding, residual stress, influence of ultrasound, heat-affected zone.

REFERENCES

1. Statnikov E.S., Muktopavels V.O. The technology of ultrasonic impact treatment as a means of increased reliability and durability of welded metal structures. *Welding production*. 2003, no. 4, pp. 25-29 (in Russian).
2. 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.
3. 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.
4. Blaha F., Langenecker B. *Naturwis.* 1955, v. 20, no. 9, p. 556.
5. 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.
6. 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.
7. 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).
 8. 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).
 9. Trofimov A.I., Trofimov M.A., Minin S.I., Kirillov Yu.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).
 10. Larionov V.P., Kuz'min V.R., Sleptsov O.I. Cold resistance of materials and elements of structures. Results and prospects. Novosibirsk. Nauka Publ., 2005, 290 p. (in Russian).
 11. Trofimov A.I., Minin S.I., Trofimov M.A., Vasilkovsky D.V., Kosyrev K.A. Automated ultrasonic system of removing residual stresses in welded connections of circulating pipelines of nuclear power plant. *Vestnik Rossijskoj akademii estestvennykh nauk*. 2015, no. 1, pp. 3-5 (in Russian).
 12. Trofimov A.I., Minin S.I., Trofimov M.A. Automated ultrasonic system of removing residual stresses in welded connections of circulating pipelines of nuclear power plants. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016, no. 3, pp. 13-19 (in Russian).
 13. Abramov O.V., Gorbenko I.G., Svehla S.A. Ultrasonic treatment of materials. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p. (in Russian).
 14. Abramov O.V. Crystallization of the metals in ultrasonic field. Moscow. Metallurgiya Publ., 1972. 256 p. (in Russian).
 15. Kulemin A.V. Ultrasound and Diffusion in Metals. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1978. 200 p. (in Russian).
 16. Kudryavtsev P.I. Residual welding stresses and strength of connections. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1964. 96 p. (in Russian).
 17. Trofimov A.I., Minin S.I., Trofimov M.A. Automated ultrasonic system of removing residual stresses in welded connections of circulating pipelines of nuclear power plants. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016, no. 3, pp. 13-19 (in Russian).

Author

Minin Sergey Ivanovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: akid@inbox.ru