

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.787.6.004

doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-24-30

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ КОРПУСОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Максим Евгеньевич Жидков<sup>1</sup>, Андрей Викторович Киричек<sup>2✉</sup>, Валерий Александрович Лебедев<sup>3</sup>, Дмитрий Львович Соловьев<sup>4</sup>, Сергей Александрович Силантьев<sup>5</sup>, Сергей Владимирович Баринов<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

<sup>2</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>3</sup> Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>4,5,6</sup> Владимирский государственный университет, Муром, Россия

<sup>1</sup> zhidkov\_me@atom mash.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5563-8242>

<sup>2</sup> avkbg tu@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

<sup>3</sup> va.lebedev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7305-6046>

<sup>4</sup> murstin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4475-319X>

<sup>5</sup> ppdsio@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3524-385X>

<sup>6</sup> box64@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5963-0547>

### Аннотация

Одной из проблем производства и эксплуатации корпусов ядерных реакторов является обеспечение долговечности их сварных соединений. Большая толщина стенок реактора и соответственно толщина сварного шва требует применения методов упрочнения формирующих упрочненный поверхностный слой на большую глубину. Рассмотрена возможность применения для повышения отрицательных значений температуры критической хрупкости волнового деформационного упрочнения, которое, в отличие от других методов ППД, позволяет управлять большим количеством технологических факторов в широком диапазоне значений, обеспечивая тем самым заданные параметры упрочнения поверхностного слоя. Особенностью способа является получение глубины упрочненного слоя достигающей 6-10 мм, а также формирование как равномерно, так и гетерогенно упрочненной структуры. Проведен комплекс исследований влия-

ния параметров волнового деформационного упрочнения на ударную вязкость образцов сварных соединений, изготовленных аналогично по технологии и регламентам, определенным при изготовлении сварных швов корпусов ядерных реакторов. Установлены режимы волнового деформационного упрочнения, формирующие гетерогенно упрочненную структуру, способствующие повышению отрицательных значений температуры критической хрупкости сварных швов ядерного реактора. Результаты исследований открывают перспективы для дальнейших исследований возможности применения волнового деформационного упрочнения для повышения эксплуатационных свойств сварных швов корпусов ядерных реакторов.

**Ключевые слова:** упрочнение, волна, деформация, ударная вязкость, температура, корпус, реактор.

Ссылка для цитирования:

Жидков М.Е. Перспективы применения волнового деформационного упрочнения сварных швов корпусов ядерных реакторов / М.Е. Жидков, А.В. Киричек, В.А. Лебедев, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, С.В. Баринов // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 11. – С. 24-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-24-30.

Original article

Open Access Article

## PROSPECTS FOR APPLYING WAVE DEFORMATION HARDENING OF WELDS OF REACTOR VESSELS

Maksim Evgenyevich Zhidkov<sup>1</sup>, Andrey Viktorovich Kirichek<sup>2✉</sup>, Valery Aleksandrovich Lebedev<sup>3</sup>, Dmitry Lvovich Solovyov<sup>4</sup>, Sergey Aleksandrovich Silantyev<sup>5</sup>, Sergey Vladimirovich Barinov<sup>6</sup>

<sup>1</sup> "AEM-technology" JSC "Atomash" branch, Volgodonsk, Rostov region, Russia

<sup>2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>3</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>4,5,6</sup> Vladimir State University, Murom, Russia

<sup>1</sup> zhidkov\_me@atomash.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5563-8242>

<sup>2</sup> avkbgtu@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

<sup>3</sup> va.lebidev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7305-6046>

<sup>4</sup> murstin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4475-319X>

<sup>5</sup> ppdsio@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3524-385X>

<sup>6</sup> box64@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5963-0547>

## Abstract

One of the problems of reactor vessel production and operation is to ensure the durability of their welded joints. The large thickness of the reactor walls and, accordingly, the thickness of the weld requires the use of hardening methods that form a hardened surface layer to a great depth. The possibility of using wave deformation hardening to increase negative temperature values of critical brittleness is considered, which, unlike other surface plastic deformation methods, allows controlling a large number of technological factors in a wide range of values, thereby providing the specified parameters of surface layer hardening. A feature of the method is to obtain a depth of the hardened layer reaching 6-10 mm, as well as the formation of both a uniformly and heterogeneously hardened struc-

ture. The effect of wave deformation hardening parameters on the impact strength of samples of welded joints made similarly according to the technology and regulations determined during the manufacture of reactor vessel welds are studied comprehensively. The modes of wave deformation hardening are found out, which form a heterogeneously hardened structure, contributing to an increase in negative temperatures of the critical fragility of reactor welds. The research results open up prospects for further study of the possibility to use wave deformation hardening to improve the operational properties of reactor vessel welds.

**Keywords:** hardening, wave, deformation, impact strength, temperature, vessel, reactor.

## Reference for citing:

Zhidkov ME, Kirichek AV, Lebedev VA, Solovyov DL, Silantyev SA, Barinov SV. Prospects for applying wave deformation hardening of welds of reactor vessels. *Transport Engineering*. 2024;11:24-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-24-30.

Надежность корпусов ядерных реакторов во многом зависит от качества сварных соединений. Ресурс блоков АЭС с реакторами определяется преимущественно радиационным ресурсом корпуса реактора, который, в свою очередь, зависит от сопротивления материала корпуса хрупкому разрушению. При этом основным и лимитирующим расчетным параметром является критическая температура хрупкости металла сварного шва, расположенного напротив активной зоны реактора и испытывающего максимальное нейтронное облучение. Высокое содержание вредных примесей в металле сварного шва (прежде всего фосфора, меди и др.) ускоряет охрупчивание и вызывает необходимость применения специальных дорогостоящих мер для его предупреждения [1-4].

На практике используется ряд технологических приемов, способствующих повышению эксплуатационной прочности сварных конструкций, путем специальной обработки швов и зоны термического влияния, к их числу относятся: создание на

участке шва с пониженной пластичностью смягченного поверхностного слоя; наплавка пластичных поверхностных слоев металла; термическая обработка; поверхностное пластическое деформирование (ППД) металла шва обкаткой роликами, обдувкой дробью и др. Указанные способы позволяют устранить или значительно снизить уменьшение усталостной прочности деталей, вызванной процессом сварки, а также получить сварное соединение с достаточно высокой степенью равнопрочности.

Для обеспечения качества сварных соединений предпочтительно локальное, но глубокое упрочнение наиболее нагруженных в процессе эксплуатации участков. Вследствие этого применение большинства известных способов ППД, позволяющих получать глубину упрочнения не более 1...3 мм, нецелесообразно [5].

Для повышения эксплуатационной прочности сварных конструкций корпуса реактора представляется перспективным использование способа волнового дефор-

мационного упрочнения (ВДУ) статико-импульсной обработкой (СИО), который позволяет обеспечивать большую глубину (до 6...10 мм) и значительную степень упрочнения поверхностного слоя. При ВДУ упрочненный поверхностный слой формируется под действием комбинированной статической и динамической нагрузки. Предударное статическое поджатие инструмента к обрабатываемой поверхности позволяет пролонгировать действие ударных импульсов за счет использования отраженных волн деформации и более полно передавать энергию удара в очаг деформации. Форма ударных импульсов регулируется геометрическими параметрами ударной системы, состоящей из бойка и волновода, на конце которого крепится деформирующий инструмент. Ударная система рассчитывается в соответствии с волновой теорией так, чтобы генерировать ударный импульс с формой, которая позволяет передавать максимальное количество кинетической энергии удара данному упрочняемому материалу [6, 7].

Важной особенностью ВДУ является возможность регулирования равномерности упрочнения. В результате в поверхностном слое может формироваться как равномерно, так и гетерогенно упрочненная структура, чередующая твердые и пластичные участки, что благоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах упрочненных деталей. Упрочненная поверхность при ВДУ образуется нанесением на нее множества отпечатков с заданным перекрытием друг друга. Комплексным параметром, позволяющим регулировать равномерность упрочнения, является коэффициент перекрытия пластических отпечатков, который объединяет в себе скорость подачи заготовки относительно инструмента  $S$  (мм/мин), частоту ударов  $f$  (Гц), и размер отпечатка  $\delta$  (мм)

$$K = 1 - \frac{S}{\delta f 60}.$$

Если  $K = 0$ , то край одного отпечатка граничит с краем другого; если  $0 < K < 1$ , то отпечатки перекрываются; при  $K = 1$  происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место [8-10].

Таким образом, технологическими параметрами ВДУ являются:

- энергия ударов;
- статическая сила поджатия волновода с инструментом к упрочняемой поверхности;
- число проходов;
- коэффициент перекрытия пластических отпечатков.

Для установления возможностей применения ВДУ для снижения критической температуры хрупкости металла сварного шва проведены экспериментальные исследования, для которых изготавливались образцы в виде сварных проб (имитаторов) сварного соединения корпуса реактора из стали 15Х2НМФА аналогичные по типу и конфигурации сварного соединения, по способу и режимам сварки, по марке сварочных материалов (сварочная проволока св-08А с флюсом ФЦ-16А), по режимам и способам термической обработки и другим значимым параметрам. Сварочные материалы соответствовали НП-104-18, НП-105-18, ПНАЭ Г-7-009-89, ПНАЭ Г-7-010-89. Требования к термической обработке, предварительному и сопутствующему подогреву соответствовали НТД на изделия, НП-104-18, ПНАЭГ-7-009-89, РТД2730.300.02-91. Требования к химическому составу металла шва, механическим свойствам металла шва и сварного соединения соответствовали требованиям НП-105-18, ПНАЭ Г-7-010-89, РТД2730.300.02-91, РД5.УЕИА.2430-2007, РД5.УЕИА.3579-2011, РКД и ПКД на корпус реактора.

Для оценки эффекта влияния упрочнения ВДУ на температуру критической хрупкости с целью минимизации количества опытов и количества изготавливаемых образцов было принято решение стабилизировать большую часть технологических факторов ВДУ на уровне рациональных значений, которые ранее позволяли обеспечивать хорошие результаты упрочнения при обработке различных ответственных машиностроительных изделий. Таким образом, использовались следующие параметры ВДУ сварного соединения: энергия ударов 150 Дж, частота ударов 9 Гц, статическая сила поджатия волново-

да с инструментом к упрочняемой поверхности 40 кН. В качестве инструмента применялся стержневой ролик со следующими размерами: диаметр 10 мм, ширина 40 мм. На разных уровнях варьировали только коэффициент перекрытия – 0,2; 0,4; 0,6 и число проходов (кратность упрочнения волной деформации) – 1 или 2.

Испытания на определение критической температуры хрупкости сварных соединений (КТХ СВ) производились при трех температурах:  $T_k - 10^\circ\text{C}$ ,  $T_k$ ,  $T_k + 30^\circ\text{C}$ , где  $T_k$  – критическая температура хрупкости, при каждой температуре испытывалось не менее 3 образцов. Критериальные значения устанавливались в зависимости от предела текучести материала при температуре  $20^\circ\text{C}$ , который определялся при испытании образцов на растяжение. Надрез типа V на образцах на ударный изгиб выполнялся параллельно упрочненной ВДУ поверхности, на стороне противоположной упрочненной (рис. 1).

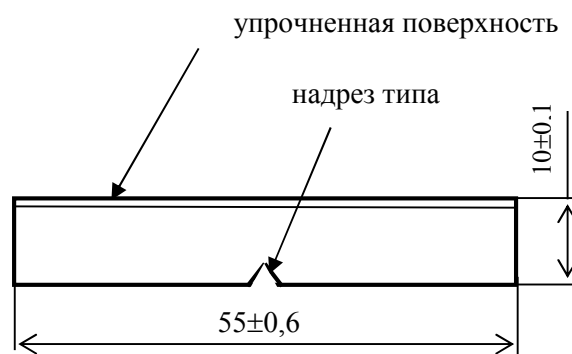


Рис. 1. Образец для испытаний на ударную вязкость

Fig. 1. Impact test specimen

В результате анализа экспериментальных данных (рис. 2) выявлена наблюдающаяся в большинстве случаев закономерность, связанная со снижением ударной вязкости упрочненного ВДУ материала при уменьшении температуры испытаний (в области отрицательных значений температур).

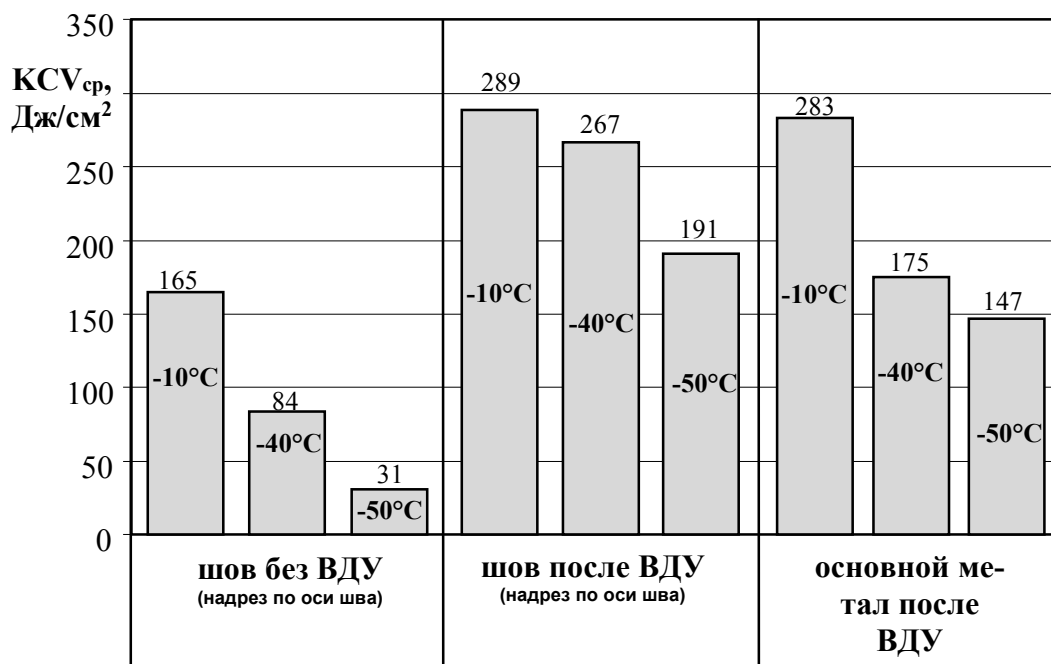


Рис. 2. Средняя ударная вязкость образцов (режим ВДУ:  $K=0,2$ ; два прохода)

Fig. 2. Average impact strength of samples (WDH mode:  $K=0.2$ ; two passes)

Установлено, что второй проход не дает существенного прироста свойств материала или его степени упрочнения, однако позволяет стабилизировать показатели качества поверхностного слоя и уменьшить разброс экспериментальных данных.

Найдено, что при ВДУ с коэффициентом перекрытия 0,2 в два прохода, т.е. когда формировалась гетерогенно упрочненная структура, ударная вязкость на сварном шве при температуре  $-50^\circ\text{C}$  ( $T_k - 10^\circ\text{C}$ ) составила  $KCV = 289 \text{ Дж/см}^2$ , при

температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_k\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) составила  $KCV = 267\text{ Дж/см}^2$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_k + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) составила  $KCV = 191\text{ Дж/см}^2$ , что больше чем без упрочнения ВДУ на сварном шве соответственно в 1,75 раза, 3,18 раза и 6,16 раза. На основном металле ударная вязкость при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_k - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) составила  $KCV = 283\text{ Дж/см}^2$ , при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_k\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) составила  $KCV = 175\text{ Дж/см}^2$ , при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_k + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) составила  $KCV = 147\text{ Дж/см}^2$ , что больше чем без упрочнения ВДУ на сварном шве соответственно на 1,72 раза, 2,08 раза и 4,74 раза.

Для неупрочненных сварных швов предел текучести составил  $\sigma_T = 545\text{ МПа}$ , что согласно [11] соответствует ударной вязкости  $KCV = 49\text{ Дж/см}^2$ . Для образцов

## Выводы

Результаты сравнительного анализа данных измерений обработанного ВДУ материала образцов сварных соединений реактора свидетельствуют, что свойства упрочненного ВДУ и неупрочненного ма-

териала существенно отличаются. Таким образом, наличие эффекта влияния волнового деформационного упрочнения на свойства материала сварных соединений реактора можно считать доказанным.

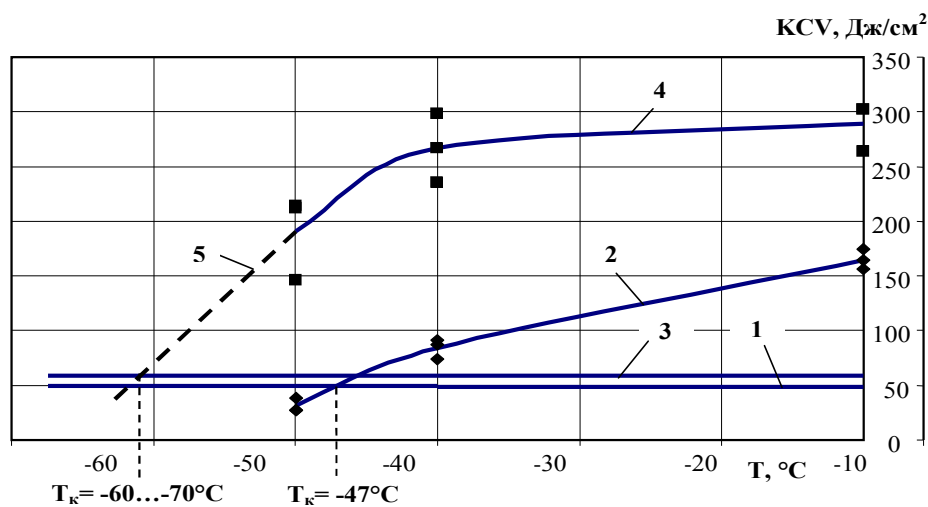


Рис. 3. Определение температуры критической хрупкости сварного шва без упрочнения и после ВДУ (режим ВДУ  $K = 0,2$ , в два прохода):

- 1 – ударная вязкость образца без упрочнения, полученная исходя из предела текучести по [11];
- 2 – ударная вязкость образца без упрочнения; 3 – ударная вязкость образца после ВДУ, полученная исходя из предела текучести по [11]; 4 – ударная вязкость образца после ВДУ;
- 5 – прогнозируемая ударная вязкость образца после ВДУ

Fig. 3. Determination of the temperature of critical brittleness of a weld without hardening and after WDH (WDH mode:  $K = 0,2$ ; two passes):

- 1 – impact strength of the specimen without hardening, obtained on the basis of yield strength according to [11]; 2 – impact strength of the specimen without hardening; 3 – impact strength of the specimen after the WDH, obtained on the basis of the yield strength according to [11]; 4 – impact strength of the specimen after the WDH;
- 5 – predicted shock strength of the specimen after WDH

Установлено существование режимов ВДУ, формирующих гетерогенно упрочненную структуру, для которых характер кривой среднего значения ударной вязкости сварного шва при различных температурах испытаний соответствует КХТ в диапазоне  $-60...-70$  °С, что в 1,3...1,5 раза

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колоколов Е.И., Томилин С.А., Шишов В.В. Обеспечение конструктивной прочности сварных соединений реакторных установок посредством применения новых сварочных материалов и технологий // Глобальная ядерная безопасность, 2017 №3(24), С. 77–90
2. Тимофеев М.Н., Галяткин С.Н. Исследование структуры и свойств металла сварного соединения корпуса атомного реактора из Cr–Mo–V стали в процессе изготовления и эксплуатации. Вопросы материаловедения. 2022, №2(110), С. 111-123. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-110-2-111-123>
3. В.И. Сурин, А.С. Щербань, А.А. Щербakov, М.Е. Жидков, С.А. Томилин, М.Б. Иваний / Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении // Глобальная Ядерная Безопасность. 2023, (1). С. 36-53. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>
4. Полякова Р.О. Исследование металла ЗТВ сварных соединений корпусов реакторов из стали 15Х2НМФА-А. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва: 2023. 182 с.
5. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
6. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пласти-

## REFERENCES

1. Kolokolov EI, Tomilin SA, Shishov VV. Ensuring the structural strength of welded joints of reactor plants by using new welding materials and technologies. Global Nuclear Safety. 2017;3(24):77-90.
2. Timofeev MN, Galyatkin S.N. Study of the structure and properties of the metal of reactor pressure vessel welded joints made of Cr–Mo–V steel in the process of manufacture and operation. Voprosy Materialovedeniya [Internet]. 2022;2(110):111-123. Available from: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-110-2-111-123>
3. Surin VI, Shcherban AS, Shcherbakov AA, Zhidkov ME, Tomilin SA, Ivanov MB. Justification of scanning contact potentiometry applicability to test NPP equipment during its manufacture. Global Nuclear Safety [Internet]. 2023;(1):36-53. Available from: <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>

превышает значение КТХ неупрочненного ВДУ материала сварного шва.

Можно утверждать о перспективности технологии ВДУ, как способа влияния на температуру критической хрупкости сварных соединений корпуса атомного реактора.

- ческим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
7. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Технологические возможности статико-импульсной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 8. С. 3-5
8. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Перспективы кратного повышения эксплуатационных свойств естественным армированием металлических материалов при технологическом обеспечении многоуровневой гетерогенной структуры // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4 (112). С. 3-10
9. Kirichek A.V., Soloviev D.L. and Silant'ev S.A. Effect of the structure heterogeneously hardened by impact deformation waves upon impact strength of the material // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012157 (5 pp)
10. Создание гетерогенно модифицированной структуры способами, использующими волновое деформационное упрочнение / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.В. Яшин, С.А. Силантьев. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023, Т. 19. № 8 (224). С. 364-369. DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-8-364-369
11. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Приложение 2. п.5. Методика определения критической температуры хрупкости.

4. Polyakova RO. Study of ЗТВ metal of welded joints of reactor vessels made of 15Х2НМФА-А steel [dissertation]. [Moscow (RF)]: 2023.
5. Odintsov LG. Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
6. Kirichek AV, Solovyov DL, Lazutkin AG. Technology and equipment of static pulse treatment by surface plastic deformation. Library of technologist. Moscow: Mashinostroenie; 2004.
7. Kirichek AV, Solovyov DL. Technological possibilities of static-pulse treatment treatment. Strengthening Technologies and Coatings. 2006;8:3-5.
8. Kirichek AV, Solovyov DL. Prospects for a multiple increase in operational properties by natural reinforcement of metal materials technologically

- providing a multilevel heterogeneous structure. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2014;4(112):3-10.
9. Kirichek AV, Soloviev DL, Silant'ev SA. Effect of the structure heterogeneously hardened by impact deformation waves upon impact strength of the material. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 124 (2016) 012157 (5 pp)
10. Kirichek AV, Solovyov DL, Yashin AV, Silant'ev SA. Making a heterogeneously modified structure

by methods using wave deformation hardening. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2023;19(8(224)):364-369. DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-8-364-369

11. PNAE-7-002-86 Calculation standards for the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Appendix 2. Methods to determine the critical temperature of brittleness. Moscow: Energoatomizdat;1989.

#### **Информация об авторах:**

**Жидков Максим Евгеньевич** – директор филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», тел. +7(863) 929 29 29.

**Киричек Андрей Викторович** – доктор технических наук, профессор, проректор по перспективному развитию, Брянский государственный технический университет, тел. (4832) 51 51 38.

**Лебедев Валерий Александрович** – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, тел. +7 (863) 273 83 60.

**Zhidkov Maksim Evgenyevich** – Director of "AEM-technology" JSC "Atomash" Branch; phone: +7(863) 929 29 29.

**Kirichek Andrey Viktorovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Advanced Development, Bryansk State Technical University; phone: (4832) 51 51 38.

**Lebedev Valery Aleksandrovich** – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University; phone: +7 (863) 273 83 60.

**Соловьев Дмитрий Львович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ТМС, Владимирский государственный университет, тел. (49234) 77 1 44.

**Силантьев Сергей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры ТМС, Владимирский государственный университет, тел. (49234) 77 1 44.

**Баринов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры ТМС, Владимирский государственный университет, тел. (49234) 77 1 44.

**Solovyov Dmitry Lvovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vladimir State University; phone: (49234) 77 1 44.

**Silant'ev Sergey Aleksandrovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vladimir State University; phone: (49234) 77 1 44.

**Barinov Sergey Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vladimir State University; phone: (49234) 77 1 44.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 09.10.2024; одобрена после рецензирования 11.10.2024; принята к публикации 28.10.2024. Рецензент – Куц В.В., доктор технических наук, профессор Юго-Западного государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 09.10.2024; approved after review on 11.10.2024; accepted for publication on 28.10.2024. The reviewer is Kuts V.V, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Southwest State University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**