

УДК 621.7.092; 621.762.07

Технологическая обработка способа обеспечения стабильности процесса и защиты внутренней поверхности при электронно-лучевой сварке полых сферических и цилиндрических сосудов из титановых сплавов

С.С. Юхневич, Е.В. Паничев, А.Ю. Рязанцев, Е.В. Смоленцев

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Technological development of a method to ensure process stability and protect the internal surfaces during the electron-beam welding of hollow spherical and cylindrical vessels made of titanium alloys

S.S. Yukhnevich, E.V. Panichev, A.Yu. Ryazantsev, E.V. Smolentsev

Voronezh State Technical University

Рассмотрена технологическая проблема обеспечения чистоты и состояния внутренних поверхностей при изготовлении сварной конструкции титанового баллона с ограниченным доступом во внутреннюю полость, используемого в баковых емкостях криогенных компонентов топлива ракетно-космической техники. В качестве решения проблемы предложена оригинальная конструкция составного защитного приспособления с медными гасящими остаточную эмиссию электронного луча и ограничивающими разлет выплесков (брызг) расплавленного металла, вкладышами и устройствами для их установки, фиксации и извлечения из изделия. Выполнена обработка предложенного способа защиты внутренней поверхности от брызг и подплавлений остаточной эмиссией электронного луча закрытых полостей полых сферических сосудов из титановых сплавов при электронно-лучевой сварке кольцевых соединений. Приведены результаты исследования по подтверждению качества получаемого соединения, решения проблемы и соответствия изделия в целом требованиям конструкторской документации.

EDN: PMRTNE, <https://elibrary/pmrtne>

Ключевые слова: титановый баллон, электронно-лучевая сварка, сварной шов, сварочные брызги, защитное приспособление, технологическая обработка

The paper considers a technological problem of ensuring cleanliness and state of the internal surfaces in manufacturing the titanium cylinder welded structure with a limited access to the internal cavity used in tank containers of the rocket and space cryogenic fuel components. To solve the problem, the paper proposes an original design of the combined protective screen with copper inserts and devices for their installation, fixation and removal from the product. Such inserts dampen the electron beam residual emission and limit the molten metal splashes spread. The proposed method of protecting the inner surface from splashes and melting by the electron beam residual emission of the closed cavities of hollow spherical

vessels made of titanium alloys during the electron beam welding of the ring joints was developed. Study results are provided to confirm the resulting connection quality, solution to the problem and compliance of the product in general with requirements of the design documentation.

EDN: PMRTNE, <https://elibrary/pmrtne>

Keywords: titanium cylinder, electron beam welding, weld seam, welding spatter, protection device, technological development

В состав изделий ракетно-космической техники входят емкости из титановых сплавов, отличающиеся меньшей массой благодаря большей удельной прочности, работающие в условиях погружения в среду сжиженного компонента топлива (кислорода) и выполняющие специальные функции, вследствие чего к их конструкции предъявляют специальные требования [1–4].

Одним из элементов титановой емкости высокого давления, определяющим ее характеристики, являются сварные швы. При серийном изготовлении сферических сосудов из титановых сплавов (толщиной 2,5...11,0 мм) без подкладных элементов или замковых соединений ограничен доступ во внутреннюю полость.

К сосудам, предъявляют повышенные требования по прочности, герметичности и чистоте (за счет вакуумного переплава) сварных швов и внутренних поверхностей. В целях обеспечения указанных требований применяют технологию электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в глубоком вакууме [5], защищенную патентами [6–8].

Для проверки работоспособности титановой емкости при отработке технологии ЭЛС выбраны оптимальные конструкции свариваемых кромок экваториального шва и соединения приварки фланца к полусфере баллона, обеспечивающие заданные конечные геометрические параметры соединения и баллона, требуемые механические свойства и эксплуатационные характеристики изделия [9–11].

В нормативной документации изложены следующие требования к геометрическим параметрам торцов и собранного соединения полусфер:

- неплоскостность торца не более 0,4 мм;
- разнотолщинность в пределах допуска на толщину $\pm 0,2$ мм;
- смещение кромок не более 0,4 мм.

Цель работы — поддержание технологических показателей, обеспечение стабильности процесса и защиты от брызг при ЭЛС полых

сосудов из титановых сплавов с ограниченным доступом во внутреннюю полость.

Отработка сварки проведена на установках ЭЛУ-8, ЭЛУ-9 и ЭЛУ-10 с использованием технологических комплексов ЭЛТА-60/15 и ЭЛТА-60/60, оснащенных электронно-лучевыми пушками, которые обеспечивают ускоряющее напряжение 60 кВ [12]. Указанные установки позволяют выполнять процесс сварки в автоматическом режиме с поддержанием заданных параметров при остаточном давлении в вакуумной камере, не превышающем $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Технология ЭЛС экваториального сварного шва 1 титановой емкости (рис. 1) отработана на плоских и цилиндрических образцах сплава ВТ-6С толщиной 2,5...11,0 мм. Сварка выполнена по многопроходной схеме, обеспечивающей равномерный прогрев, расфокусированным специальным образом лучом. Это позволило сформировать проплав с плавным переходом к основному материалу и практически исключить образование на внутренней поверхности сварочных выплесков (брызг), которые не допускает нормативная документация.

При экспериментальной отработке величина расфокусировки электронного луча, непосредственно влияющая на качество сварного соеди-



Рис. 1. Внешний вид титановой емкости, свариваемой из полусфер ЭЛС

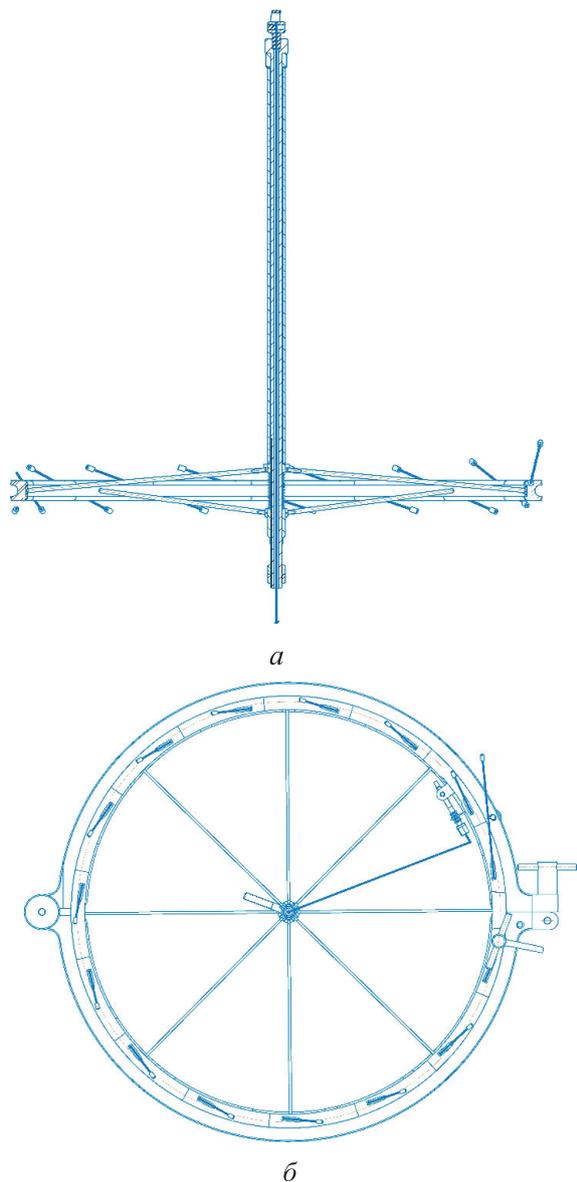


Рис. 2. Схемы приспособления для защиты от сварочных брызг и подплавления внутренней поверхности полусфер:
 а — секторный подкладной элемент в сборе;
 б — приспособление-хомут для сборки подкладного элемента

нения, подобрана так, чтобы обеспечивать следующее:

- требуемую глубину проплавления;
- формирование и плавный переход проплава к основному материалу;
- геометрические размеры сварочной ванны, уравновешиваемые силами поверхностного натяжения в сочетании со скоростью сварки для исключения прожога соединения;
- раскрытие пародинамического канала в сварочной ванне с целью уменьшения давления паров;

- высоту и ширину проплава, компенсирующие допускаемые отклонения сборки (разно-толщинность, смещение кромок, разницу стыкуемых диаметров, зазор).

По результатам патентного поиска не выявлено приемов и устройств для защиты внутренних поверхностей сферических емкостей с ограниченным доступом во внутреннюю полость при ЭЛС.

Традиционными рекомендациями к проведению сварочных работ без использования несъемных подкладных элементов является применение наполненных рубленой проволокой или флюсом емкостей с их последующим удалением и обработкой проплава.

В современных методах для решения рассматриваемой задачи предложено использовать ленточные керамические самоклеящиеся подкладные элементы, неприменимые для емкостей с ограниченным доступом во внутреннюю полость и отрицательно влияющие на вакуум в процессе ЭЛС.

Для защиты от сварочных брызг и подплавления внутренней поверхности полусфер остаточной эмиссией электронного луча при сварке баллонов объемом 25 л разработаны новый способ и приспособление (рис. 2, а) с хомутом для его установки (рис. 2, б) [13, 14].

Расчетно-экспериментальным путем получена зависимость габаритных размеров и количества секторов-вкладышей от отношения диаметра проходного отверстия сосуда к диаметру стыка по месту установки защитного приспособления (рис. 3).



Рис. 3. Фрагменты сборки защитного приспособления и баллона:
 а — с хомутом на нижней полусфере до закрытия разъема;
 б — с установленным приспособлением перед сваркой после прихватки

В процессе ЭЛС на установке ЭЛУ-8 по режимам ранее отработанного технологического процесса со скоростью сварки 25 м/ч отличий от штатной сварки не выявлено. Для определения возможности проверки провара сварного соединения до удаления подкладного элемента выполнен рентгенографический контроль с применением рентгеновского аппарата Comet.

По результатам расшифровки снимков выявлено отсутствие возможности контроля дефектов сварного шва из-за увеличения суммарно просвечиваемой толщины и слабой проницаемости медного сплава, использованного для подкладных элементов, относительно контролируемой стенки. При этом имеется ограниченная возможность подтверждения выхода проплава в боковой проекции.

Чтобы подтвердить возможность удаления приспособления через отверстие фланца со штуцером диаметром 20 мм сваренной титановой емкости и последующего рентгенографического контроля, выполнена обработка процесса разборки приспособления, включающего в себя ослабление винта стяжки распорных спиц и извлечение элементов приспособления в сборе за счет установленных соединительных тросиков (рис. 4, а). Трудностей с извлечением элементов приспособления не выявлено. На поверхности секторных медных элементов подкладного кольца подплавлений от электронного луча и контакта с проплавом сварного шва не обнаружено (рис. 4, б).

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность извлечения элементов защитного приспособления через отверстие штуцера фланца, после завершения операции сварки экваториального шва.

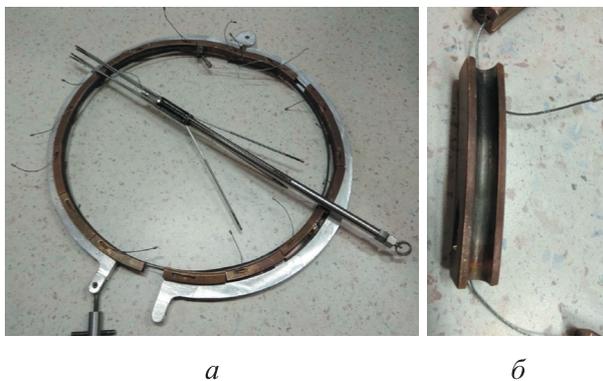


Рис. 4. Внешний вид защитного приспособления после извлечения из баллона (а) и сектора приспособления после сварки (б)

Для осуществления рентгенографического контроля сварного шва на наличие сварочных брызг и подплавлений в околошовной зоне (ОШЗ) выполнена вырезка кольца экваториального шва и ОШЗ шириной 20 мм. По результатам визуального осмотра сварочных брызг, подплавлений и следов меди на внутренней поверхности титановой емкости высокого давления не обнаружено (рис. 5).

Из вырезанного кольцевого элемента баллона с экваториальным швом и ОШЗ подготовлен образец (макрошлиф) для проведения металлографического исследования (рис. 6).

По результатам металлографических исследований установлено, что сварной шов соответствует предъявляемым требованиям, дефектов сварочного характера не обнаружено. Следов медного сплава от элементов защитного приспособления на поверхности образца не найдено.

Результаты технологической обработки предложенного способа подтверждают следующее:

- эффективность защиты внутренней поверхности титановой емкости от сварочных

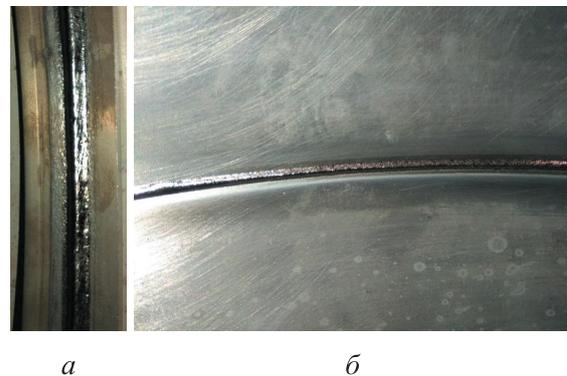


Рис. 5. Внешний вид сварного шва (а) и внутренней поверхности сферы после удаления приспособления (б)

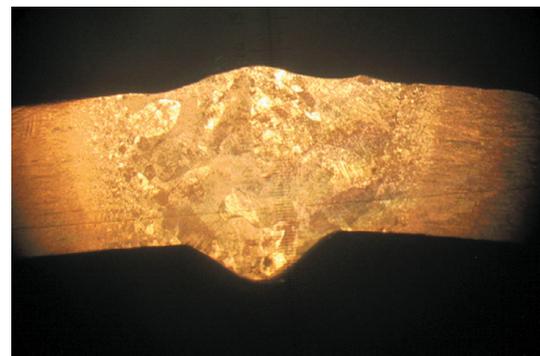


Рис. 6. Внешний вид макрошлифа сварного шва

брызг и остаточной эмиссии электронного луча;

- отсутствие влияния подкладного элемента из медного сплава на формирование проплава сварного шва и ОШЗ;

- стойкость подкладного элемента при выполнении сварки титановой емкости со скоростью 25 м/ч в рабочих режимах;

- работоспособность защитного приспособления в части установки при сборке с использованием хомута и сварке на ЭЛУ, а также последующего извлечения после проведения операции сварки через проходное отверстие диаметром 20 мм баллона объемом 25 л;

- возможность тиражирования предложенного способа на другие типоразмеры полых сферических или цилиндрических сосудов из титановых сплавов.

Вывод

Предложены уникальная оснастка и способ обеспечения стабильности процесса, поддержания технологических показателей и обеспечения защиты от брызг при ЭЛС полых сферических или цилиндрических сосудов из титановых сплавов с ограниченным доступом во внутреннюю полость [15].

Литература

- [1] Ломакин И.В., Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С. и др. Создание передовой технологии и оборудования для изготовления титановых шар-баллонов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 37–43, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-37-43>
- [2] Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С. Разработка и внедрение импортозамещающей технологии изготовления титановых баллонов. *Мат. Всерос. молодеж. конкурса науч.-тех. работ Орбита молодежи*. Санкт-Петербург, БГТУ Военмех, 2019, с. 229–230.
- [3] Воробей В.В., Логинов В.Е. Технология производства жидкостных ракетных двигателей. Москва, Изд-во МАИ, 2001. 496 с.
- [4] Витковская А.А., Севостьянов А.К., Кириллов О.Н. Изготовление титановых шарбаллонов на Воронежском механическом заводе. *Научная опора Воронежской области*. Воронеж, ВГТУ, 2019, с. 93–96.
- [5] Гребенщиков А.В., Портных А.И., Еремин М.В. и др. Применение электронно-лучевой сварки при изготовлении титановых шарбаллонов. *Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Мат. док. межд. науч.-тех. конф.* Самара, Самарский университет, 2016, с. 133–135.
- [6] Гребенщиков А.В., Портных А.И., Шуваева Л.П. и др. Способ электронно-лучевой сварки кольцевых соединений титановых сплавов. Патент РФ 2016118569. Заявл. 12.05.2016, опублик. 16.11.2017.
- [7] Портных А.И., Татаринцев А.А., Паничев Е.В. и др. Способ электронно-лучевой сварки деталей. Патент 2681067. Заявл. 17.01.2018, опублик. 01.03.2019.
- [8] Алимкина Л.П., Белавин А.И., Кочергин С.А. и др. Подкладка для формирования кольцевого сварного шва. Патент РФ 157428. Заявл. 09.07.2015, опублик. 10.12.2015.
- [9] Кишуров В.М., Смыслов А.М. Оптимизация обработки титановых сплавов. *Мат. Всероссийской науч.-практ. конф.* Уфа, УГАТУ, 2020, с. 22–26.
- [10] Мартынов В.Н., Хохловский А.С., Слива А.П. и др. Электронно-лучевая сварка сталей, алюминиевых и титановых сплавов большой толщины. *Сварочное производство*, 2009, № 12, с. 22–25.
- [11] Насад И.П., Козлов Г.А., Насад Т.Г. Особенности обработки титановых сплавов. В: *Автоматизация и управление в машино-и приборостроении*. Саратов, СГТУ, 2019, с. 64–66.
- [12] Севостьянов А.К., Витковская А.А., Кириллов О.Н. Уникальное сварочное оборудование, применяемое в машиностроении. *Научная опора Воронежской области*. Воронеж, ВГТУ, 2020, с. 314–316.
- [13] Грицюк В.Г., Рязанцев А.Ю., Болдырев А.А. и др. Совершенствование технологической подготовки машиностроительного производства. В: *Современные технологии производства в машиностроении*. Воронеж, Научная книга, 2019, с. 56–61.

- [14] Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С. Разработка и внедрение импортозамещающей технологии изготовления титановых баллонов. *Мат. всерос. молодеж. конкурса науч.-тех. работ Орбита молодежи*. Санкт-Петербург, БГТУ Воентех, Инфо-Да, 2019, с. 229–230.
- [15] Ковалев С.В., Юхневич С.С., Паничев Е.В. и др. *Способ электронно-лучевой сварки закрытых сферических и цилиндрических сосудов и защитное приспособление для его реализации*. Патент РФ 2733964. Заявл. 03.03.2020, опубл. 08.10.2020.

References

- [1] Lomakin I.V., Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. et al. Development of advanced technology and equipment for manufacture of titanium spherical vessels. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 12, pp. 37–43, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-37-43> (in Russ.).
- [2] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. [Development and introduction of import-substituting technology of titanium cylinders manufacturing]. *Mat. vseros. molodezh. konkursa nauch.-tekh. rabot Orbita molodezhi* [Proc. Russ. Youth Contest of Sci.-Tech. Works “Youth Orbit”]. Sankt-Petersburg, BGTU Voentekh Publ., 2019, pp. 229–230. (In Russ.).
- [3] Vorobey V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Technology of production of liquid rocket engines]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2001. 496 p. (In Russ.).
- [4] Vitkovskaya A.A., Sevostyanov A.K., Kirillov O.N. [Manufacturing of titanium balloons at Voronezh Mechanical Plant]. *Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti* [Scientific Support of the Voronezh Region]. Voronezh, VGTU Publ., 2019, pp. 93–96. (In Russ.).
- [5] Grebenschikov A.V., Portnykh A.I., Eremin M.V. et al. [The use of electronic-beam welding in the manufacture of titanium spherical balloon]. *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya. Mat. dok. mezhd. nauch.-tekh. konf.* [Problems and prospects of engine building development. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Samara, Samarskiy universitet Publ., 2016, pp. 133–135. (In Russ.).
- [6] Grebenschikov A.V., Portnykh A.I., Shuvaeva L.P. et al. *Sposob elektronno-luchевой svarki koltsevykh soedinenie titanovykh splavov* [Method of electron beam welding of ring compounds of titanium alloys]. Patent RU 2016118569. Appl. 12.05.2016, publ. 16.11.2017. (In Russ.).
- [7] Portnykh A.I., Tatarintsev A.A., Panichev E.V. et al. *Sposob elektronno-luchевой svarki detaley* [Method of electron-beam welding of parts]. Patent 2681067. Appl. 17.01.2018, publ. 01.03.2019. (In Russ.).
- [8] Alimkina L.P., Belavin A.I., Kochergin S.A. et al. *Podkladka dlya formirovaniya koltseвого svarnogo shva* [Lining for forming a ring weld seam]. Patent RU 157428. Appl. 09.07.2015, publ. 10.12.2015. (In Russ.).
- [9] Kishurov V.M., Smyslov A.M. [Optimization of titanium alloy processing]. *Mat. Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Proc. Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Ufa, UGATU Publ., 2020, pp. 22–26. (In Russ.).
- [10] Maptynov V.N., Khokhlovskiy A.S., Sliva A.P. et al. Electron-beam welding of steels, aluminium and titanium alloys of large thickness. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 12, pp. 22–25. (In Russ.).
- [11] Nasad I.P., Kozlov G.A., Nasad T.G. [Features of processing of titanic alloys]. V: *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashino-i priborostroenii* [In: Automation and control in machine and instrument engineering.]. Saratov, SGTU, 2019, pp. 64–66. (In Russ.).
- [12] Sevostyanov A.K., Vitkovskaya A.A., Kirillov O.N. [Unique welding equipment used in the mechanical engineering industry]. *Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti* [Scientific Support of the Voronezh Region]. Voronezh, VGTU Publ., 2020, pp. 314–316. (In Russ.).
- [13] Gritsyuk V.G., Ryazantsev A.Yu., Boldyrev A.A. et al. [Improvement of technological preparation of machine-building production]. V: *Sovremennye tekhnologii proizvodstva v mashinostroenii* [In: Modern production technologies in mechanical engineering]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2019, pp. 56–61. (In Russ.).

- [14] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. [Development and introduction of an import-substituting technology for production of titanium balloons]. *Mat. vseros. molodezh. konkursa nauch.-tekh. rabot Orbita molodezhi* [Proc. Russ. Youth Contest of Sci.-Tech. Works "Youth Orbit"]. Sankt-Petersburg, BG TU Voenmekh, Info-Da, 2019, pp. 229–230. (In Russ.).
- [15] Kovalev S.V., Yukhnevich S.S., Panichev E.V. et al. *Sposob elektronno-luchevooy svarki zakrytykh sfericheskikh i tsilindricheskikh sosudov i zashchitnoye prispособlenie dlya ego realizatsii* [Method for electron-beam welding of closed spherical and cylindrical vessels and protective device for its implementation]. Patent RU 2733964. Appl. 03.03.2020, publ. 08.10.2020. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 04.10.2023

Информация об авторах

ЮХНЕВИЧ Сергей Степанович — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: serge1975@yandex.ru).

ПАНИЧЕВ Евгений Владимирович — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии сварочного производства и диагностики. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: olicsp@bk.ru).

РЯЗАНЦЕВ Александр Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru).

СМОЛЕНЦЕВ Евгений Владиславович — доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com).

Information about the authors

YUKHNEVICH Sergey Stepanovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: serge1975@yandex.ru).

PANICHEV Evgeny Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Lecturer, Department of Technology of Welding Production and Diagnostics. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: olicsp@bk.ru).

RYAZANTSEV Alexander Yuryevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru).

SMOLENTSEV Evgeny Vladislavovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Юхневич С.С., Паничев Е.В., Рязанцев А.Ю., Смоленцев Е.В. Технологическая отработка способа обеспечения стабильности процесса и защиты внутренней поверхности при электронно-лучевой сварке полых сферических и цилиндрических сосудов из титановых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 4, с. 47–53.

Please cite this article in English as:

Yukhnevich S.S., Panichev E.V., Ryazantsev A.Yu., Smolentsev E.V. Technological development of a method to ensure process stability and protect the internal surfaces during the electron-beam welding of hollow spherical and cylindrical vessels made of titanium alloys. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 4, pp. 47–53.