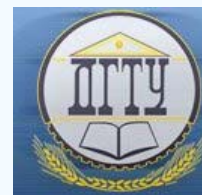


МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.14:669.15–194

10.23947/1992-5980-2017-17-3-5-89-95

Сварка трением штуцеров и патрубков малого диаметра из углеродистой стали 22К*

Ю. В. Полетаев¹, В. Ю. Полетаев², В. В. Щепкин^{3**}^{1,2,3} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Friction welding of small-diameter fittings and nozzles of 22K carbon steel***

Yu. V. Poletaev¹, V. Yu. Poletaev², V. V. Shchepkin^{3**}^{1,2,3} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Проведены экспериментальные исследования и разработаны технологические рекомендации по сварке трением (СТ) штуцеров и патрубков малого (до 80 мм) диаметра сварных конструкций теплового и атомного машиностроения. Исследована возможность применения сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра корпусного оборудования энергетических установок вместо ручной дуговой сварки (РДС) покрытым электродом.

Материалы и методы. Модели штуцерных и патрубковых узлов были изготовлены из низкоуглеродистой стали марки 22К. Выбор угла подготовки конусной поверхности, отработка параметров режима СТ и сварка штуцерных моделей диаметром 40 мм выполнялась на машине МСТ–35–5. Сварка патрубковых моделей диаметром 80 мм была осуществлена на машине МСТ–41, в условиях ОАО «ЭМК — АТОММАШ». Для выбора угла конусной поверхности и отработки параметров режима сварки была разработана конструкция модели штуцерного узла с разными углами конусной поверхности. Размеры углов сопрягаемых поверхностей стыка были выбраны с учетом энергетических возможностей сварочной машины МСТ–35–5 и ожидаемых размеров формируемой зоны сплавления, определяющих качество металла сварного соединения.

Результаты исследования. Разработано конструктивное оформление моделей и соединяемых (конусных) поверхностей штуцерных и патрубковых узлов; обоснован выбор оптимальных углов подготовки поверхностей под сварку; обоснован выбор значений параметров режима сварки и осуществлена их экспериментальная проверка; выполнена оценка качества сварных соединений неразрушающими и разрушающими методами. Установлено влияние конструктивного и технологического факторов на качество сварных соединений.

Обсуждение и заключения. Полученные положительные результаты экспериментального исследования подтвердили технологическую возможность и экономическую целесообразность сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра вместо ручной дуговой сварки покрытыми электродами. Исследование возможности применения сварки трением для приварки штуцеров и патрубков следует продолжить в направлении разработки оборудования, аттестации способа сварки, разработки и аттестации технологии сварки трением.

Introduction. The pilot study method and development of technological recommendations on friction welding (FW) of fittings and nozzles of small (up to 80 mm) diameter for welded constructions of the thermal and atomic engineering are described. The feasibility of applying the method of FW of small-diameter fittings and nozzles for the powerplant package units instead of manual arc welding (MAW) is studied.

Materials and Methods. Models of fittings and nozzle units are made of low-carbon 22K steel. The selection of the angle of the conical surface preparation, the optimization of FW mode parameters, and welding of the fitting models of 40 mm in diameter are carried out on the MST-35-5 machine. Welding of nozzle models of 80 mm in diameter is implemented on the MST-41 machine under the conditions of “EMK-ATOMMASH” JSC. A model structure of the nozzle unit with different angles of the conical surface is developed to select the angle of the conical surface and to optimize welding mode parameters. The dimensions of the mating interfaces angles are chosen allowing for the performance of the MST-35-5 welding machine, and for the anticipated dimensions of the fusion zone under formation which determine the weld metal quality.

Research Results. The design of models and connected (conical) surfaces of fitting and nozzle units is developed. The choice of optimum angles of surfaces of preparation for welding is explained. The selection of welding parameters values is proved, and their experimental verification is carried out. Welded joints quality is tested through the nondestructive and destructive methods. The effect of the constructive and technological factors on the quality of welded joints is determined.

Discussion and Conclusions. The obtained successful outcome of the pilot study has confirmed the technological capability and economic feasibility of the application of friction welding for small-diameter fittings and nozzles instead of manual arc welding with coated electrodes. Investigation of feasibility of applying FW for welding fittings and nozzles should be continued in the following directions: development of equipment; certification of the welding method; development and testing of the friction welding technology.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: anclav51@mail.ru, afshor@mail.ru, shepkinviktor@rambler.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: Сварка трением, конструкция разделки, модель патрубкового узла, низкоуглеродистая сталь, параметры режима сварки, твердость сварного соединения, макроструктура, микроструктура, качество сварного соединения.

Образец для цитирования: Полетаев, Ю. В. Сварка трением штуцеров и патрубков малого диаметра из углеродистой стали 22К / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев, В. В. Щепкин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 89–95.

Keywords: friction welding, preparation design, nozzle unit model, low-carbon steel, welding parameters, joint weld hardness, macrostructure, microstructure, joint weld quality.

For citation: Yu.V. Poletaev, V.Yu. Poletaev, V.V. Shchepkin. Friction welding of small-diameter fittings and nozzles of 22K carbon steel. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 89–95.

Введение. Для приварки штуцеров и патрубков малого диаметра корпусного оборудования ТЭС и АЭС в основном применяется ручная электродуговая сварка (РДС) покрытым электродом. Применение механизированных способов сдерживается недостаточной изученностью процесса формирования качественных сварных швов малой протяженности. Следует отметить, что недостатки РДС не позволяют обеспечить требуемое стабильное качество сварных соединений оборудования ТЭС и АЭС, что приводит к повторным дорогостоящим ремонтам и повышению технологической себестоимости сварных конструкций. Решение указанной проблемы возможно на основе исследования, разработки и внедрения технологии автоматизированных способов сварки, например, сварки трением [1, 2].

Степень разработанности темы исследования. Теоретические основы сварки трением (СТ) изложены в работах [3–5]. СТ происходит в твердом состоянии при воздействии теплоты, возникающей при трении поверхностей свариваемого изделия. Работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, превращается в теплоту, которая нагревает стык до температуры 950–1300 °С. Процесс образования сварного соединения завершают проковкой: к нагретым, но уже неподвижным деталям на некоторое время прикладывают сжимающее усилие. После проковки происходит естественное охлаждение сварного соединения. Одно из наиболее важных достоинств способа СТ — высокое качество получаемых сварных соединений [6, 7]. При правильно выбранном режиме сварки металл стыка и прилегающих к нему зон обладает прочностью, близкой к прочности основного металла. Основные параметры процесса сварки трением сравнительно легко программируются. Оборудование для сварки трением — это полуавтоматы с минимальным использованием ручного труда, либо автоматы, работа которых протекает без участия человека. Применение СТ ограничено формой и размерами сечения свариваемых деталей. Диапазон площадей сечений деталей, которые целесообразно сваривать трением, составляет 30–8000 мм². В настоящее время способ сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра не получил промышленного применения, что подтверждается отсутствием информации в литературе [8–10]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможности применения способа сварки трением для приварки штуцеров и патрубков малого диаметра из стали 22К.

Методы проведения исследований и их результаты. Качество сварного соединения, выполненного СТ, зависит от завершенности следующих процессов, протекающих на контактных поверхностях: удаление загрязнений; изнашивание и разрушение оксидных пленок и приповерхностных слоев заготовок; пластическое течение металла; упрочнение и разупрочнение поверхностных слоев; быстрый нагрев и охлаждение, вызывающие структурно-фазовые превращения; массоперенос металла с одной заготовки на другую и образование между контактными поверхностями твердых «клиньев», сформированных из срезанных микронеровностей и имеющих тенденцию к росту за счет переноса металла.

Для реализации поставленных целей были решены следующие задачи:

- разработка конструкции моделей штуцерных и патрубковых узлов; определение оптимальных геометрических размеров сопрягаемых конусных поверхностей с учетом возможностей сварочного оборудования;
- определение оптимальных углов подготовки контактирующих поверхностей деталей на основании результатов опытных сварок;
- экспериментальное обоснование выбора параметров режима сварки;
- оценка качества сварных соединений с использованием методов неразрушающего и разрушающего контроля, применяемых при изготовлении сварных конструкций АЭС.

Модели штуцерных и патрубковых узлов были изготовлены из низкоуглеродистой стали марки 22К со следующим химическим составом: углерод — 0,19; кремний — 0,20; марганец — 0,75; хром — до 0,40; никель — до 0,30; медь — до 0,30; сера — 0,045; фосфор — 0,045 весовых процентов. Механические свойства стали: временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 431$ МПа; условный предел текучести $\sigma_{0.2} = 216$ МПа; относительное удлинение $\delta = 21\%$; относительное сужение $\psi = 45\%$; ударная вязкость $KCV = 68,6$ Дж/м².

Выбор угла подготовки конусной поверхности, отработка параметров режима СТ и сварка штуцерных моделей диаметром 40 мм выполнялась на машине МСТ–35–5. Сварку патрубковых моделей диаметром 80 мм осуществляли на машине МСТ–41, в условиях ОАО «ЭМК — АТОММАШ». Для зажатия имитатора корпуса моделей патрубковых узлов был разработан и изготовлен специальный корпус к машине МСТ–41.

Для выбора угла конусной поверхности и отработки параметров режима сварки была разработана конструкция модели штуцерного узла с разными углами конусной поверхности. Размеры углов сопрягаемых поверхностей

стыка были выбраны с учетом энергетических возможностей сварочной машины МСТ-35-5 и ожидаемых размеров формируемой зоны сплавления, определяющих качество металла сварного соединения. Элементы модели штуцерного узла продемонстрированы на рис. 1.

На начальном этапе исследования выполнялась сварка модели штуцерного узла, имитатор корпуса которого имел цилиндрическую форму. При этом имитатор штуцера был изготовлен с конусным участком. При такой форме подготовки контактирующих поверхностей получить сварное соединение не удалось. В первоначальный момент процесса сварки произошел отрыв нижней части конуса имитатора штуцера по линии контакта с имитатором корпуса.

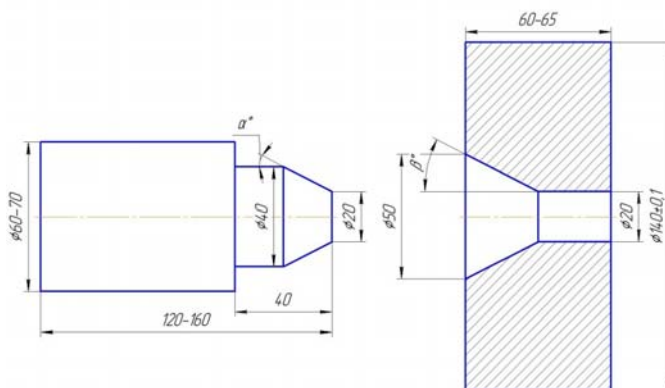


Рис. 1. Эскиз имитатора штуцера и корпуса модели штуцерного узла

Fig. 1. Sketch of simulator of fitting and nozzle unit model body

При подготовке поверхностей элементов моделей для сварки с углами: $\alpha = 30,0^\circ$; $32,5^\circ$; $35,0^\circ$; $37,5^\circ$ и 40° сварные соединения были качественно сформированы при обоснованно выбранных параметрах режима СТ. Из перечисленного ряда изготовленных сварных моделей наиболее качественные (без видимых технологических дефектов типа «несплавление») сварные соединения (рис. 2, а) получены при подготовке конусной поверхности с углом $\alpha = 37,5^\circ$ при следующих параметрах режима сварки: время редуцирования $t_{ред} = 6-10$ сек.; давление нагрева $P_H = 323$ кПа; давление проковки $P_{пр} = 539$ кПа; время сварки $t_c = 27-32$ сек; диаметр штуцера — 40 мм. На рис. 2, б изображено сварное соединение, в котором образующая конусного участка имитатора штуцера выходит на 10 мм за малый диаметр конусной поверхности имитатора корпуса. На рис. 2, в проиллюстрирован тип сварного соединения, у которого разница в углах конусных поверхностей составляет не более $1,5^\circ$. При выборе угла конусной поверхности и параметров режима сварки качество сварных соединений дополнительно оценивалось по результатам анализа макро- и микроструктуры. На основе анализа было сделано заключение о стимулирующем влиянии исследуемых факторов на качество сварного стыка.

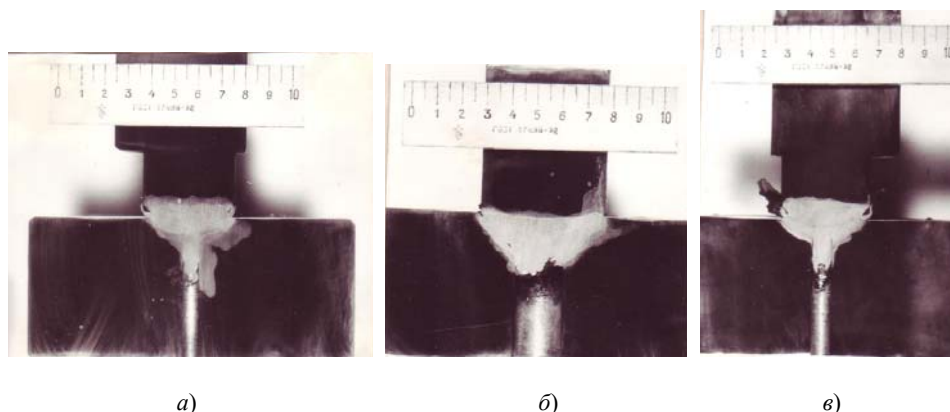


Рис. 2. Сварные соединения моделей штуцерного узла с диаметром штуцера 40 мм

Fig. 2. Weld joints of models of nozzle unit models with nozzle of 40 mm in diameter

Выполненные сварные соединения подвергали рентгенографическому контролю, ультразвуковому контролю и испытанию на растяжение, с оценкой качества как для швов первой категории [11]. Результаты экспериментов по выбору углов конусных контактирующих поверхностей и параметров режима СТ, полученные на штуцерных моделях, были учтены при разработке модели и технологии сварки патрубковых узлов (рис. 3).

Обсуждение результатов исследований. Анализ экспериментальных результатов исследований сварки штуцерных узлов показал, что формирование качественного сварного соединения зависит от влияния элементов конструктивного оформления собираемых деталей, в частности:

- от расстояния между малым диаметром конуса имитатора корпуса и малого диаметра конуса имитатора штуцера;
- от длины конусного участка имитатора штуцера, выходящего за малый диаметр конусной поверхности имитатора корпуса;
- от величины разности углов конусной поверхности имитатора штуцера и имитатора корпуса.

Указанные факторы, влияющие на деформирование сварного соединения, необходимо учитывать совместно с параметрами режима сварки $t_{ред}$ и P_n .

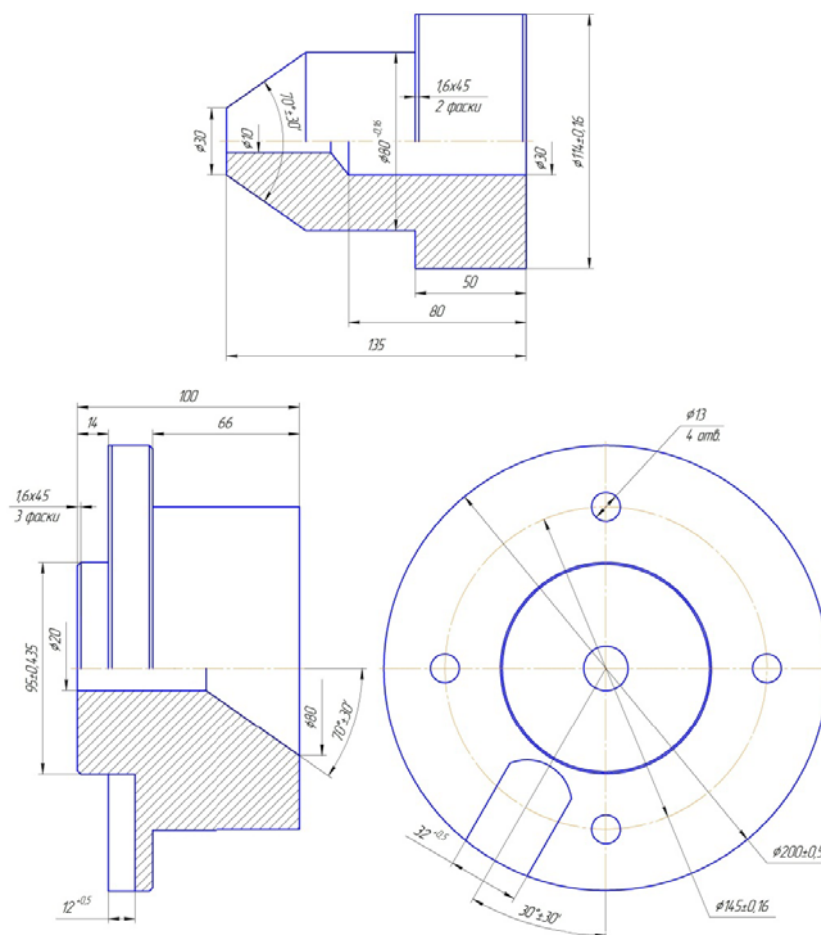


Рис. 3. Эскиз имитаторов патрубка и корпуса патрубкового узла

Fig. 3. Sketch of simulators of nozzle and nozzle unit body

Изменяя величину вышеуказанных параметров, можно сформировать качественное сварное соединение при прочих оптимальных параметрах режима сварки. Сварка моделей патрубкового узла с диаметром патрубка 80 мм выполнялась на машине МСТ-41 со следующими параметрами режима: $t_c = 40-50$ сек; $t_{ред} = 10-12$ сек.; $P_n = 630-700$ МПа; $P_{пр} = 105-120$ МПа. Сварные модели без удаления грата, образовавшегося в процессе сварки, продемонстрированы на рис. 4. Из моделей патрубкового узла, в исходном после сварки состоянии, были изготовлены образцы для механических испытаний на растяжение, ударную вязкость и угол загиба. Механические свойства металла сварного соединения: предел прочности $\sigma_b = 441-559$ МПа; предел текучести $\sigma_{02} = 314-402$ МПа; относительное удлинение $\delta = 14,5-15,5\%$; относительное сужение $\psi = 70,0-78,0\%$; угол загиба $\alpha = 123$ градуса; ударная вязкость $KCV = 127,5-251,0$ Дж/м.



Рис. 4. Сварная модель из стали 22К с диаметром патрубка 80 мм

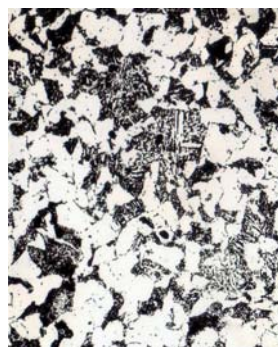
Fig. 4. Welded model from 22K steel with nozzle of 80 mm in diameter

Механические свойства металла сварного соединения по сравнению с основным металлом оказались более высокими. Анализ результатов механических испытаний и металлографических исследований показал, что для улучшения структуры и механических свойств сварного соединения стали 22К необходимо проведение термической обработки.

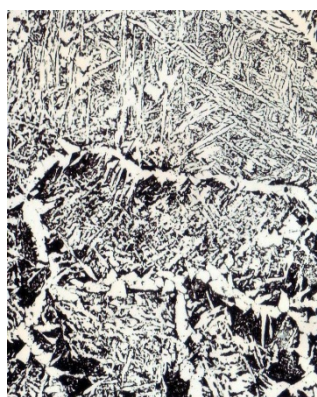
Фотография макро- и микроструктуры сварного соединения, вырезанного из модели патрубкового узла стали 22К, представлена на рис. 5. Максимальная ширина сварного шва составляет 20–25 мм и соответствует протяженности зоны максимального термдеформационного воздействия. Макроструктура сварного шва представляет собой чередующиеся зоны различной дисперсности и травимости, подвергнутые различному термдеформационному воздействию.



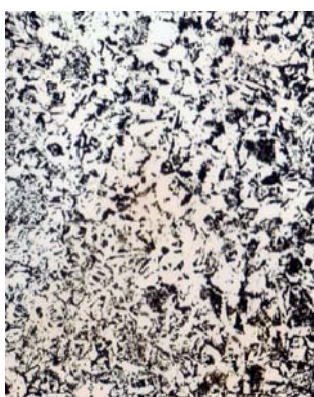
a)



b)



c)



d)



e)



f)

Рис. 5. Макро- (a) и микроструктура различных зон сварного соединения из стали 22К, выполненного сваркой трением:
b — основной металл; c, d — зона термического влияния; e, f — зона сплавления

Fig. 5. Macro- (a) and microstructure of different weld junctions of 22K steel implemented through friction welding:
b — base metal; c, d — heat-affected zone; e, f — fusion zone

На рис. 5 отчетливо выявляется зона сплавления. В макроструктуре технологических сварочных дефектов не выявлено, за исключением узкого кольцевого несправки в наружной части соединения, который удаляется при механической обработке грата.

Распределение твердости по сечению сварного соединения достаточно однородно. Твердость растет от основного металла (HV 145–155) и достигает максимума у линии сплавления (HV 200–230). Основным металлом имеет феррито-перлитную структуру (рис. 5, б). Зона термического влияния имеет ярко выраженную направленность волокна (рис. 5, в, г), в которой структура изменяется от мелкодисперсного и полиэдрического (рис. 5, в) и мелко-игольчатого феррита к видманштетовому ферриту с ферритной оторочкой по границам аустенитного зерна, являющейся характерной структурой перегретого металла.

Выводы. Положительные результаты неразрушающего и разрушающего контроля качества сварных соединений штуцерных и патрубковых моделей обосновывают возможность применения сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра (до диаметра 80 мм включительно) из стали 22К. При этом сварные соединения рекомендуется подвергать термической обработке (отпуску). Установлено, что при сварке трением по конусной поверхности происходит измельчение структуры металла на значительную глубину свариваемых элементов, что определяет высокие механические свойства металла сварного соединения. Сварные соединения наиболее высокого качества формируются при сварке трением по конусной поверхности с углом 70° . Авторы считают перспективным продолжить работу в следующих направлениях: разработка оборудования; аттестация способа сварки; разработка и аттестация технологии сварки трением.

Библиографический список

1. Воинов, В. П. Технология и оборудование сварки трением / В. П. Воинов, Р. Н. Болдырев. — Москва : Машиностроение, 1985. — 61 с.
2. Виль, В. И. Сварка металлов трением / В. И. Виль. — Ленинград : Машиностроение, 1970. — 175 с.
3. Duffin E. L., Bahrani A. S. The mechanics of friction welding mild steel // Metal Construction. 1976. — V.8. No.6. — P.267-271.
4. Kuruzar D. I. Joint design for the friction welding process // Welding Journal. 1979. — V.58. No. 6. — P. 31-35.
5. Sayegh J. Carec R. Possibilites et perspectives du soudage par friction Applications – Evolution de la technique et perspectives // Soudage et techniques connexes. 1981. — V.35. No.5. — P.152-160.
6. Bethlehem W.F. Überwachen des Reibschweißens mit dem Ziel der Gutesicherung // Dichtwelt. 1983. — V.69.No.7. — P.173-176.
7. Basile G., Benchetto A., Triouleyre J. Soudage par friction Recherche d'une correlation entre les parameters du procede et la qualite du joint // Soudage et techniques connexes. 1984. — V.38. No. 9-10. — P.338-349.
8. Каракозов, Э. С. Современное состояние сварки трением (обзор). Часть 1 / Э. С. Каракозов, Р. И. Мустафаев, Н. В. Мельникова // Сварочное производство. — 1989. — № 8. — С. 2–5.
9. Каракозов, Э. С. Современное состояние сварки трением (обзор). Часть 2 / Э. С. Каракозов, Р. И. Мустафаев, Н. В. Мельникова // Сварочное производство. — 1989. — № 9. — С. 1–4.
10. Щепкин, В. В. Перспективы применения сварки трением в машиностроении [Электронный ресурс] / В. В. Щепкин, Ю. В. Полетаев // Блокнот молодого ученого. Портал электронного обучения «Скиф». — Режим доступа : <http://moodle.dstu.edu.ru/course/view.php?id=4549> (дата обращения : 16.07.17).
11. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки : правила контроля ПН АЭГ–7–010–89. — Москва : ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1989. — 125 с.

References

1. Voinov, V.P., Boldyrev, R.N. Tekhnologiya i oborudovanie svarki treniem. [Friction welding technology and equipment.] Moscow: Mashinostroenie, 1985, 61 p. (in Russian).
2. Will, V.I. Svarka metallov treniem. [Friction welding of metals.] Leningrad: Mashinostroenie, 1970, 175 p. (in Russian).
3. Duffin, E. L., Bahrani, A. S. The mechanics of friction welding mild steel. Metal Construction, 1976, vol. 8, no. 6, pp. 267-271.
4. Kuruzar, D. I. Joint design for the friction welding process. Welding Journal, 1979, vol.58, no. 6, pp. 31-35.
5. Sayegh J., Carec R. Possibilites et perspectives du soudage par friction Applications – Evolution de la technique et perspectives. Soudage et techniques connexes, 1981, vol.35, no.5, pp. 152-160.
6. Bethlehem W.F. Überwachen des Reibschweißens mit dem Ziel der Gutesicherung. Dichtwelt, 1983, vol. 69, no. 7, pp. 173-176.
7. Basile G., Benchetto A., Triouleyre J. Soudage par friction Recherche d'une correlation entre les parameters du procede et la qualite du joint. Soudage et techniques connexes, 1984, vol. 38, no. 9-10, pp. 338-349.
8. Karakozov, E.S., Mustafae, R.I., Melnikova, N.V. Sovremennoe sostoyanie svarki treniem (obzor). Chast' 1. [Current state of friction welding (review). Part 1.] Svarochnoe Proizvodstvo, 1989, no. 8, pp. 2–5 (in Russian).

9. Karakozov, E.S., Mustafaev, R.I., Melnikova, N.V. Sovremennoe sostoyanie svarki treniem (obzor). Chast'2. [Current state of friction welding (review). Part 2.] Svarochnoe Proizvodstvo, 1989, no. 9, pp. 1–4 (in Russian).

10. Shchepkin, V.V., Poletaev, Yu.V. Perspektivy primeneniya svarki treniem v mashinostroenii. [Application prospects for friction welding in mechanical engineering.] Available at: <http://moodle.dstu.edu.ru/course/view.php?id=4549> (accessed: 16.07.17) (in Russian).

11. Oborudovanie i truboprovody atomnykh energeticheskikh ustanovok. Svarnye soedineniya i naplavki: pravila kontrolya PN AEG–7–010–89. [Equipment and pipelines of nuclear power plants. Welded joints and surfacing: rules for control of PN AEG–7–010–89.] Moscow: TsNIIATOMINFORM, 1989, 125 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 09.03.2017

Сдана в редакцию 10.03.2017

Запланирована в номер 17.07.2017

Received 09.03.2017

Submitted 10.03.2017

Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Полетаев Юрий Вениаминович,

профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, старший научный сотрудник,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5465-1886>

Anclav51@mail.ru

Полетаев Валерий Юрьевич,

директор ООО «АВАЛОН-ВИДЕО» (РФ, г. Волгодонск, Ростовская область),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3677-7500>

afshor@mail.ru

Щепкин Виктор Викторович,

студент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0659-6963>

shepkinvictor@rambler.ru

Authors:

Poletaev, Yury V.,

professor of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), senior research scholar,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5465-1886>

Anclav51@mail.ru

Poletaev, Valery Yu.,

director, “AVALON-VIDEO” JSC (RF, Volgodonsk, Rostov region),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3677-7500>

afshor@mail.ru

Shchepkin, Victor V.,

student of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0659-6963>

shepkinvictor@rambler.ru