

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КОНСТРУКЦИИ

## ELECTRON BEAM WELDING OF STRUCTURES



**К.Н. Коржов<sup>1</sup>,**  
*korzhovKN@laspace.ru;*  
**K.N. Korzhov**



**Л.И. Паршуков<sup>1</sup>,**  
*кандидат физико-  
математических наук,  
parshukovLI@laspace.ru;*  
**L.I. Parshukov**



**Ю.В. Соколова<sup>1</sup>,**  
*кандидат  
технических наук,  
sokolovaIUV@laspace.ru;*  
**Y.V. Sokolova**

*В настоящей работе предложена технология получения кольцевого сварного соединения из аустенитной стали регулятора способом электронно-лучевой сварки, состоящая из двух технологических переходов: подготовительного и основного. Подготовительный переход выполняется в два приёма: во-первых, на первом обороте проводится прогрев, во-вторых, на следующем обороте проводится прихватка. Основной переход, выполняемый при осуществлении третьего оборота, состоит в импульсной сварке со снижением погонной энергии по линейной зависимости. Между предварительным и основным переходами выполняется пауза, необходимая для остывания сварного соединения. В связи асимметрией толщины сварного соединения использовали асимметрическое энерговыделение за счёт специальной развёртки. Предложенная технология электронно-лучевой сварки позволяет снизить остаточные деформации за счёт плавного и постепенного нагрева предварительного перехода и пониженного тепловложения основного перехода. Получаемые сварные соединения соответствуют требованиям отраслевых стандартов по дефектности, ресурсные испытания подтверждают обеспечение работоспособности сварной конструкции.*

*In this paper, a technology is proposed for producing an annular welded joint from austenitic steel regulator by electron beam welding, consisting of two technological transitions: preparatory and main. The preparatory transition is performed in two steps: first, warming up is carried out on the first turn, and secondly, a tack is carried out on the next turn. The main transition performed during the implementation of the third revolution consists in pulse welding with a decrease in linear energy. There is a pause between the preliminary and main transitions necessary for cooling of the welded joint. Due to the asymmetry of the thickness of the welded joint, an asymmetric energy input was used due to a special sweep. The proposed electron beam welding technology makes it possible to reduce residual deformations due to smooth and gradual heating of the pre-transition and reduced heat input of the main transition. The resulting welded joints comply with the requirements of industry standards for defects, resource tests confirm the operability of the welded structure.*

<sup>1</sup> АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Lavochkin Association, JSC, Russia, Moscow region, Khimki.

**Ключевые слова:**

режимы нагрева, прихваток и сварки;  
асимметричное соединение;  
электронно-лучевая сварка;  
конструкция с замыкающими швами.

DOI: 10.26162/LS.2024.56.75.019

В различных областях промышленности создают стальные сварные конструкции, которые должны быть устойчивы к образованию остаточных сварочных деформаций, а также быть стабильны во времени. В частности, к таким конструкциям относится устройство регулирования потоков теплоносителя, применяемое в контурных трубах для систем обеспечения тепловых режимов и терморегулирования космических аппаратов.

Для понижения деформаций возможно применение различных мер для компенсации остаточной деформации: необходимо стремиться к минимальному объёму расплавленного металла, к уменьшению тепловложения путём применения как периодического (импульсная сварка, частичный отвод проволоки и т.д.), так и постоянно действующего охлаждения (подкладные элементы с повышенной теплопередачей, обдув инертным газом и т.д.) (Николаев Г.А., Куркин С.А., Виноградов В.А., 1983). Электронно-лучевая сварка удачно сочетает в себе перечисленные технологические меры для компенсации остаточных деформаций в конструкции (Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н., 1987).

## 1. Методика исследования

Целью данной работы является создание электронно-лучевой технологии получения соединения типа С90 ОСТ 92-1021-81, включающей нагрев, выполнение прихваток, охлаждение и сварку на примере регулятора давления контурных тепловых труб, изготовленного из аустенитной стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5236-72. Сварные соединения выполняли на электронно-лучевой установке СВ-112, исследования макроструктуры сварных швов вели с помощью металлографического микроскопа типа ММР-4, ресурсные испытания и испытания на герметичность проводили на специальных испытательных стендах.

Контроль за выполнением качества полученных сварных швов обеспечивали визуальным и рентгенографическим контролем (по требованиям ко II категории сварных швов ОСТ 92-1114-80) на наличие дефектов: пор, трещин, непроваров. Испытания на прочность и герметичность образцов со сварными швами проводили при внутреннем давлении 60 кгс/см<sup>2</sup> в течение пяти минут. Испытания

**Keywords:**

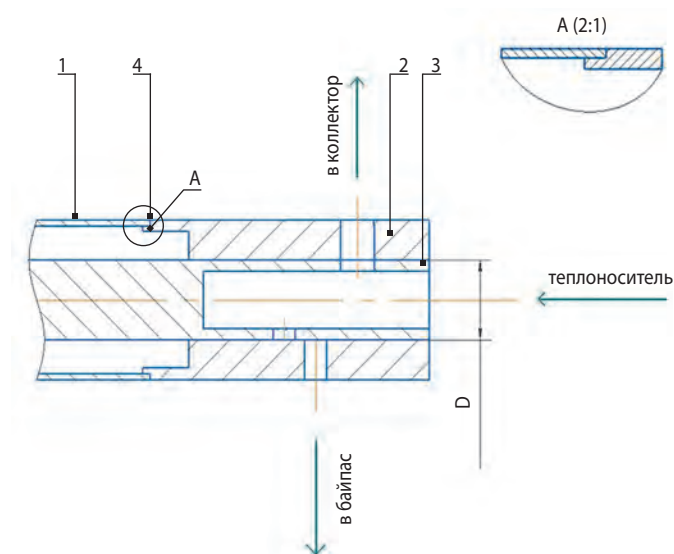
heating, tack and welding modes;  
asymmetrical joint;  
electron beam welding;  
structure with closing seams.

на герметичность конструкции проводили при внутреннем давлении 40 кгс/см<sup>2</sup> 10%-й гелиево-воздушной смесью в вакуумной камере.

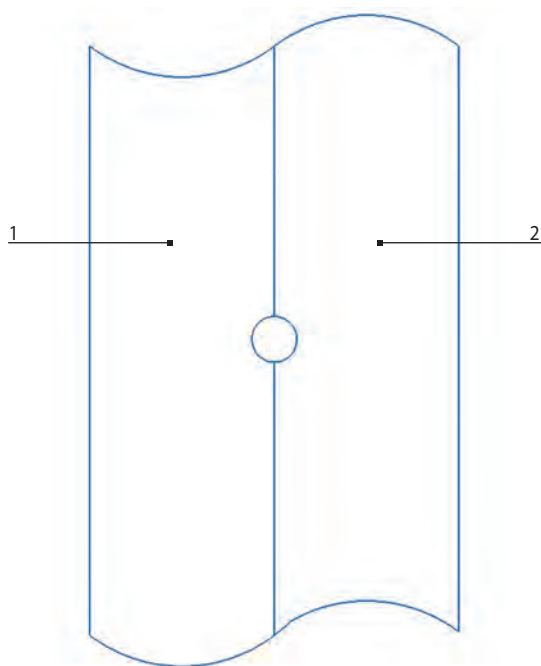
Настоящее исследование является продолжением работ по развитию технологии сварки (Паршуков Л.И. и др., 2020; Коржов К.Н. и др., 2023) различных элементов системы обеспечения теплового режима космических аппаратов на предприятии (Паршуков Л.И., Панин Ю.В., Коржов К.Н., 2020; Коржов К.Н., Паршуков Л.И., Соколова Ю.В., 2023; Коржов К.Н., Панин Ю.В., Паршуков Л.И., Балыкин М.А., 2023).

## 2. Результаты исследований

Общий вид конструкции коллектора, включающей сварное соединение С90 ОСТ 92-1021-82, приведён на рисунке 1. Коллектор применяется для регулирования потоков теплоносителя и состоит из аксиально расположенных тонкостенной 1 и толстостенной 2 деталей, а также штока 3, коаксиально установленного внутри свариваемых деталей с обеспечением постоянного зазора между ними. Электронно-лучевой сваркой соединяются детали 1 и 2. Шток устанавливается в конструкцию до начала технологического воздействия электронным лучом с допусками,

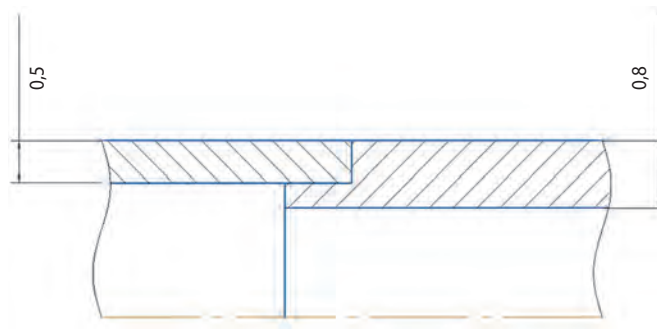


**рисунки 1.** Общий вид конструкции устройства управления потоками



**рисунк 2.** Изображение симметричной развёртки электронного луча в виде окружности

обеспечивающими его скользящую посадку по осевому направлению отверстия днища стакана до начала технологии с тем, чтобы после технологического воздействия шток не заклинивался. Таким образом, конструкция коллектора предполагает применение технологических и конструкторских решений по минимизации теплового воздействия.



**рисунк 3.** Конструкция стыкового сварного соединения типа C90

Электронно-лучевую сварку осуществляли в вакууме путём перемещения электронного луча с симметричной развёрткой и с заданной частотой (рисунк 2) по стыку тонкостенной и толстостенной деталей при их вращении вокруг продольной оси в два перехода.

Каждый переход технологии осуществляют при вращении конструкции в манипуляторе с различной скоростью. Скорость оборота свариваемых по стыку деталей при их вращении вокруг продольной при первом переходе, включающем прогрев и прихватки, в два раза меньше, чем при втором переходе, при котором производится сварка, причём второй переход осуществляют не позднее, чем через 30 секунд после завершения первого перехода из-за перезагрузки программ.

**таблица 1** – Параметры режима подготовительного перехода (нагрев)

№ п/п	параметры	значение
1	ускоряющее напряжение, кВ	60
2	ток луча, мА	1,5–1
3	ток фокусирующей линзы мА. (Положение фокуса относительно поверхности сварного соединения)	699 (расфокусированный луч)
4	скорость сварки, мм/с	2,4
5	частота импульсов, Гц	6
6	продолжительность импульса воздействия электронного луча в процентном отношении от продолжительности периода, %	75
7	частота сканирования, Гц	250
8	параметры, определяющие амплитуду для сканирующих колебаний на поверхности сварного соединения, %	0,5
9	вид сканирующих колебаний. (Круговая развёртка с градиентом скоростей. Отношение скорости движения электронного луча по тонкостенной детали к скорости движения электронного луча по толстостенной детали)	2

**таблица 2** – Параметры режима подготовительного перехода (фиксации прихватками)

№ п/п	параметры	значение
1	ускоряющее напряжение, кВ	60
2	ток луча, мА	3
3	ток фокусирующей линзы мА. (Положение фокуса относительно поверхности сварного соединения)	675 (расфокусированный луч)
4	скорость сварки, мм/с	2,4
5	частота импульсов, Гц	6
6	продолжительность импульса воздействия электронного луча в процентном отношении от продолжительности периода, %	75
7	частота сканирования, Гц	250
8	параметры, определяющие амплитуду для сканирующих колебаний на поверхности сварного соединения, %	0,5
9	вид сканирующих колебаний. (Круговая развёртка с градиентом скоростей. Отношение скорости движения электронного луча по тонкостенной детали к скорости движения электронного луча по толстостенной детали)	2

**таблица 3** – Параметры режима основного перехода (сварка)

№ п/п	параметры	значение
1	ускоряющее напряжение, кВ	60
2	ток луча, мА	4–3
3	ток фокусирующей линзы мА. (Положение фокуса относительно поверхности сварного соединения)	671 (сфокусированный луч)
4	скорость сварки, мм/с	5,5
5	частота импульсов, Гц	6
6	продолжительность импульса воздействия электронного луча отношении от продолжительности периода, %	75
7	частота сканирования, Гц	250
8	параметры, определяющие амплитуду для сканирующих колебаний на поверхности сварного соединения, %	0,5
9	вид сканирующих колебаний. (Круговая развёртка с градиентом скоростей. Отношение скорости движения электронного луча по тонкостенной детали к скорости движения электронного луча по толстостенной детали)	2



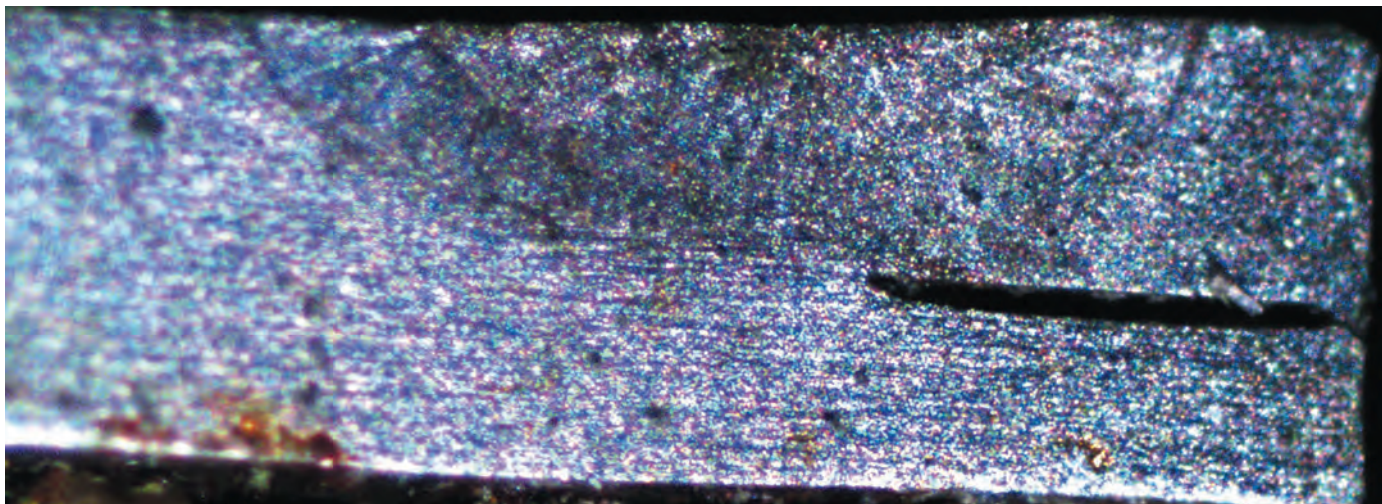


рисунок 4. Макроструктуры сварного шва

На первом переходе технологии осуществляют предварительный прогрев свариваемых деталей до температуры от 120°C до 200°C и фиксацию сварного соединения за счёт прихваток, что позволяет провести дегазацию кромок деталей в области сварного шва (согласно п. 4.1.14 ОСТ 92-1152-2014) и способствует уменьшению деформации сварного соединения после второго перехода технологии (перехода сварки).

Конкретная реализация предложенной технологии рассмотрена на устройстве для регулирования потоков теплоносителя со стыковым сварным соединением 4, (тип С90), выполненным из стали 12Х18Н10Т, диаметром 14 мм, толщиной кромки крышки 0,5 мм, корпуса диаметром 14 мм и толщиной кромки 0,8 мм (рисунок 3).

Перед сваркой поверхности сварных соединений готовят согласно ОСТ 92-1152-75, а саму технологию изготовления сварного соединения регулятора осуществляют с учётом требований ОСТ 92-1021-81.

После подготовки поверхности сварных соединений процесс технологии осуществляют по стыку деталей за два перехода в вакуумной камере электронно-лучевой установки типа СВ-112 путём перемещения электронного луча с симметричной развёрткой типа круга с градиентом скорости с частотой 250–500 Гц.

Подготовительный переход (включает приёмы нагрев и фиксация прихватками) осуществляют с постоянной скоростью 2,4 мм/с, а на третьем переходе технологии (сварка) скорость вращения деталей равна 5,5 мм/с, при ускоряющем напряжении 60 кВ.

Параметры развёртки при нагреве задаются в интерфейсе программного обеспечения установки значениями, определяющими отклонения по осям  $X$  и  $Y$  соответственно 0,5 и 0,5; максимального тока – 1,5 мА.

Параметры развёртки при фиксации прихватками задаются в интерфейсе программного обеспечения установки значениями, определяющими отклонения по осям  $X$  и  $Y$  соответственно 0,5 и 0,5; максимального тока – 3 мА.

Основной переход (сварка) осуществляют не позднее, чем через 30 секунд после завершения предварительного перехода. Параметры развёртки на основном переходе (сварка) задаются в интерфейсе программного обеспечения установки значениями, определяющими отклонения по осям  $X$  и  $Y$  соответственно 0,5 и 0,5; максимального тока – 4 мА.

При нагреве, фиксация прихватками и сварке скорость движения электронного луча по круговой развёртке в угловом интервале 0° до 180° в два раза больше скорости движения электронного луча в интервале от 180° до 360°, что позволяет обеспечить прогрев свариваемых по стыку деталей до необходимых параметров на каждом переходе сварки.

Сварочный переход осуществляется переменной погонной энергией: происходит её постоянное снижение по линейной зависимости на протяжении всего перехода от величины  $E_n$ , Дж/м в начале оборота детали, до величины  $E_k$ , Дж/м в конце оборота детали, определяемой из соотношения:

$$E_k = k \cdot E_n, \quad (1)$$

где  $0,6 \leq k \leq 0,8$ .

Снижение погонной энергии в начале оборота детали  $E_n$  до величины в конце оборота детали  $E_k$  по линейной зависимости (2) осуществляли для того, чтобы скомпенсировать постоянное повышение температуры детали при сварке кольцевых соединений.

Для учёта асимметрии толщины сварного соединения (см. рисунок 3) применяют различное долевое распределение погонной энергии относительно стыка свариваемых деталей. Величину долевого

распределения погонной энергии относительно стыка определяют из соотношений:

$$E^1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{v_1}{v_2}\right)} \cdot \frac{IU}{V}, E^2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{v_1}{v_2}\right)} \cdot \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{IU}{V}, \quad (2)$$

где  $E^1$  – погонная энергия электронного луча на угловом интервале развёртки от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , приходящаяся на тонкостенную деталь, Дж/мм;

$E^2$  – погонная энергия электронного луча на угловом интервале развёртки от  $180^\circ$  до  $360^\circ$ , приходящаяся на толстостенную деталь, Дж/мм;

$v_1$  – скорость движения электронного луча в угловом интервале развёртки от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  на тонкостенной детали, м/с;

$v_2$  – скорость движения электронного луча в угловом интервале развёртки от  $180^\circ$  до  $360^\circ$  на толстостенной детали, м/с.

На обоих технологических приёмах подготовительного перехода (нагрев и фиксация прихватками) на стык деталей воздействуют импульсным расфокусированным или сфокусированным лучом, а на основном переходе (сварке) – импульсным сфокусированным лучом с частотой в диапазоне от 4 до 10 Гц. Начальный ток луча при нагреве равен 1,5 мА, при фиксации прихватками – 3 мА, на третьем – 4 мА. При полном обороте устройства регулирования потоков теплоносителя ток луча изменяется до 1 мА при нагреве и до 3 мА при сварке. При фиксации прихватками ток был неизменный и составлял 3 мА. Прихватки производили на участках  $60^\circ$  в четырёх равномерно распределённых по периметру местах (таблицы 1–3).

Полученные сварные швы стали марки 12Х18Н10Т были подвергнуты рентгенографическому контролю на наличие дефектов. Согласно данным исследований, дефектов в сварных швах не обнаружено. Металлографические исследования также показали отсутствие непровара и газовых пор (рисунок 4). Из рисунка видно, что шов имеет грибовидную форму. Ширина сварного шва достигает 6,0 мм. Режим электронно-лучевой сварки обеспечивает проплавление на всю толщину основного металла до «замка». Граница сплавления тонкая, чёткая без грубых выделений по границам зёрен. Зона термического влияния состоит из рекристаллизованных равновесных зёрен строения и имеет ширину порядка 1,5 мм.

Далее, в соответствии с конструкторской документацией, были проведены испытания на прочность и герметичность. Результаты испытаний на прочность показали, что сварные швы выдерживают давление 60 кгс/см<sup>2</sup> в течение пяти минут без разрушения. Испытания на герметичность сварных швов методом вакуумной камеры с подачей 10% гелиево-

воздушной смеси во внутреннюю полость сваренной конструкции регулятора при внутреннем давлении 40 кгс/см<sup>2</sup> показали, что негерметичность составляет не более  $1 \times 10^{-5}$  л·мкм рт. ст./с.

Рентгенографические исследования подтвердили соответствие сварных соединений требованиям ОСТ 92-1114-80.

Проведённые ресурсные испытания на срабатывание устройства из партии восьми регуляторов показали положительные результаты. Данные устройства испытали более трёх тысяч срабатываний при заданной программе изменения давления на специальном стенде.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена технология электроннолучевой сварки для получения качественного сварного соединения из аустенитной стали с пониженным теплоложением и его равномерным распределением по периметру.

2. Предложенный режим успешно прошёл апробацию на соединении типа С90 ОСТ 92-1021 с подтверждением качества рентгенографическими, металлографическими исследованиями и ресурсными испытаниями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. Электронно-лучевая сварка / Ред. Б.Е. Патон. К.: АН УССР, Ин-т электросварки им. Е.О. Патона, 1987. 241 с.

Николаев Г.А., Куркин С.А., Виноградов В.А. Сварные конструкции Технология изготовления автоматизация производства и проектирование сварных конструкций. М.: Высшая школа, 1983. 344с.

Коржов К.Н., Паришуков Л.И., Соколова Ю.В. Исследование влияния параметров электронно-лучевой сварки на качество швов тепловых труб // Вестник НПО Лавочкина. 2023. № 4. С. 107-110.

Коржов К.Н., Панин Ю.В., Паришуков Л.И., Балыкин М.А. Способ электронно-лучевой сварки кольцевого соединения тонкостенной и толстостенной деталей, выполненных из разнородных алюминиевых сплавов // Патент на изобретение RU № 2803446. Бюл. № 26. 2023.

Паришуков Л.И., Панин Ю.В., Коржов К.Н. Новая технология электронно-лучевой сварки для соединения разнородных материалов аксиальных тепловых труб // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 4. С. 50-54.

Статья поступила в редакцию 28.08.2024

Статья после доработки 24.10.2024

Статья принята к публикации 24.10.2024