

УДК 621.7

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-375-384

Для цитирования: Изготовление заготовок гибких волноводных секций космического аппарата лазерной сваркой / Д. С. Вервейко, А. В. Мурыгин, С. К. Злобин и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 375–384. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-375-384.

For citation: Verveyko D. S., Myrygin A. V., Zlobin S. K., Gusev V. U., Patraev E. V., Mikhnev M. M. [Production of blanks for flexible waveguide sections of the spacecraft by laser welding]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 2, P. 375–384. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-375-384.

Изготовление заготовок гибких волноводных секций космического аппарата лазерной сваркой

Д. С. Вервейко¹, А. В. Мурыгин², С. К. Злобин¹, В. Ю. Гусев¹,
Е. В. Патраев¹, М. М. Михнёв¹

¹Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: verveykods@iss-reshetnev.ru

В настоящее время в АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева проводятся работы по освоению производства заготовок гибких волноводных секций (ГВС) сечениями от 20×10 до 70×30, с толщиной стенки 0,1 мм из медного сплава БрБ2. Предельные отклонения размеров внутреннего канала составляют не более 0,1 мм. Такие методы изготовления заготовок ГВС давлением, как раскатка и вытяжка, занимают до 20 рабочих смен и включают в себя большое количество циклов (от 6 до 8), требуют проведения термообработки и травления деталей после каждого цикла. В связи с этим была поставлена задача по снижению трудоёмкости изготовления заготовок ГВС. Решением задачи может являться сварка обечаек из листовых заготовок на формирующем приспособлении с последующим выполнением продольного шва. В рамках решения поставленной задачи выполнен расчет количества энергии, необходимого для проплавления кромок детали, проведен анализ возможности сборки различными способами сварки тонкостенных оболочек с точными размерами.

Анализ материала показал, что сварка должна проводиться в инертных средах. Для сварки образцов были выбраны способы: дуговая сварка в среде защитного газа аргона неплавящимся электродом, микроплазменная и лазерная сварка. В ходе работ были сварены 30 образцов 100×200, показывающие, что при дуговой и микроплазменной сварке образуются дефекты у 70 % образцов, в то время как при лазерной сварке – только у 5 %. Получены следующие выводы: при дуговых способах сварки малых толщин возникают недопустимые дефекты из-за нестабильности дуги, тогда как при использовании лазерной сварки наблюдается равномерное формирование сварного шва. На образцах, сваренных лазерной сваркой, были проведены металлографические исследования и испытания на разрыв, показывающие удельную прочность металла сварного шва не менее 90 % от прочности основного металла и отсутствие дефектов в сечении металла шва.

Ключевые слова: заготовка, лазерная сварка, волновод.

Production of blanks for flexible waveguide sections of the spacecraft by laser welding

D. S. Vervevko¹, A. V. Myrygin², S. K. Zlobin¹, V. U. Gusev¹,
E. V. Patraev¹, M. M. Mikhnev¹

¹Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"

52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: vervevkods@iss-reshetnev.ru

Currently, JSC "ISS" named after Academician M. F. Reshetnev is working on the development of the production of billets of flexible waveguide sections (DHW) with sections from 20×10 to 70×30, with a wall thickness of 0.1 mm made of BrB2 copper alloy. The maximum deviation of the size of the inner channel is not more than 0.1 mm. Such methods of manufacturing DHW blanks by pressure, such as rolling and drawing, take up to 20 working shifts and include a large number of cycles (from 6 to 8), require heat treatment and etching of parts after each cycle. In this regard, the task was set to reduce the complexity of the production of DHW blanks. The solution to the problem can be welding of shells from sheet blanks on a forming device, followed by the execution of a longitudinal seam. As part of the solution of the task, the calculation of the amount of energy required to melt the edges of the part was carried out, the analysis of the possibility of assembly by various welding methods for welding thin-walled shells with exact dimensions was carried out.

The analysis of the material showed that welding should be carried out in inert media. The following methods were chosen for welding the samples: arc welding in the environment of argon protective gas with a non-melting electrode, microplasma and laser welding. In the course of the work, 30 samples of 100×200 were welded, showing that 70 % of the samples are defective during arc welding and microplasma welding, while only 5 % are formed during laser welding. The following conclusions are obtained: with arc welding methods of small thicknesses, unacceptable defects occur due to the instability of the arc, whereas when using laser welding, uniform formation of the weld is observed. Metallographic studies and tensile tests were carried out on samples welded by laser welding, showing the specific strength of the weld metal at least 90 % of the strength of the base metal and the absence of defects in the cross section of the weld metal.

Keywords: billet, laser welding, waveguide.

Введение

Развитие технологий в производстве космической техники идет в соответствии с целями и задачами, которые определяются потребителями спутниковых услуг на ближайшую и длительную перспективу. В настоящий момент развернуты приоритетные работы по созданию много-спутниковой системы «Сфера», в которую будут входить такие орбитальные группировки, как «Экспресс-РВ», «Скиф» и «Марафон», состоящие из более чем 270 космических аппаратов (КА). При планировании производства КА указанной системы определены следующие направления и задачи, требующие освоения и решения:

- существенный рост количества изготавливаемых КА;
- снижение стоимости производства КА и сроков их изготовления;
- совершенствование технических характеристик полезной нагрузки (ПН) КА, работающих в диапазонах высоких частот;
- увеличение в составе производимых КА доли ПН собственного изготовления, в том числе с целью обеспечения импортозамещения и импортонезависимости.

Исходя из указанных задач, определены приоритетные направления технологического развития АО «ИСС», одним из которых является развитие собственного волноводного производства, обеспечивающего современный научно-технический уровень продукции [1–3].

Условия эксплуатации современных волноводных трактов требуют применения в составе их конструкций гибких волноводных секций (ГВС). Учитывая то, что на сегодняшний день в России нет производителей ГВС требуемого уровня, а поставки продукции таких ведущих мировых производителей, как Cobham Microwave, затруднены или невозможны, изготовление ГВС собственными силами является безальтернативным условием комплектования ПН КА производства АО «ИСС». Внедрение технологии лазерной сварки заготовок гибких волноводных секций – одно из решений, позволяющих значительно сократить сроки и стоимость изготовления волноводов, обеспечить требуемую точность геометрических размеров волноводных каналов, а, следовательно, и точность проходящего сигнала.

Проработка возможного способа сборки заготовок ГВС показала недостаточный уровень изучения вопросов формирования качественных сварных соединений тонколистовых заготовок из медных сплавов. Разработка и внедрение технологического процесса лазерной сварки ГВС потребовали аналитического расчета тепловых режимов сварки, с последующим подтверждением результатов расчета методами физического моделирования, подбора оборудования, проектирования и изготовления специализированной оснастки, обеспечивающей требуемые геометрию заготовок, формирование сварного шва, а также уровень защиты сварного шва в процессе сварки. Термомеханические воздействия, которые испытывают волноводный тракт в течение срока активного существования КА (до 15 лет), требуют так же оценки напряженно-деформируемого состояния ГВС после сварки и оценку прочностных характеристик сварных соединений ГВС. Ряд из указанных вопросов является предметом данной статьи.

Входные данные

Основным элементом ГВС является гофра с жесткими требованиями конструкторской документации по точности внутренних размеров канала в пределах 0,1 мм и отклонениям по толщине стенки в пределах 0,01 мм. Необходимость отсутствия сквозных дефектов металла и высокой точности геометрии внутреннего канала обусловлена требованиями радиотехнических параметров, а также масса-габаритными и прочностными требованиями.

В настоящий момент в АО «ИСС» внедрены ряд технологий по изготовлению заготовок ГВС при помощи механической деформации. Известны методы изготовления заготовок ГВС, такие как раскатка и вытяжка [4; 5]. Благодаря этим технологиям получаются геометрически точные заготовки, с высоким качеством внутренней поверхности. Однако эти методы обработки давлением обладают существенными недостатками.

Так, процесс изготовления заготовок методами давления характеризуется значительной трудоёмкостью и может занимать до 20 рабочих смен. Количество повторяющихся операций, необходимых для достижения требуемого размера, составляет от 6 до 8 циклов – это наименьшее число переходов, выполняемых с наибольшей степенью деформации без дефектов в виде разрывов металла. В свою очередь, число циклов также зависит от размера сечения будущей гибкой секции (чем больше сечение, тем больше число циклов). Более того, из-за структурно-фазовых превращений в основном металле, после каждого цикла заготовки необходимо подвергать термической обработке, а также проводить операции травления поверхности детали перед проведением нового цикла.

В данной работе была решена задача по получению технологии изготовления заготовок ГВС с минимальными затратами труда для сечений от 20×10 до 70×30, с толщиной стенки 0,1 мм из медного сплава БрБ2 ДПРНМ ГОСТ 1789-13.

Предложенный подход

Решением поставленной задачи является сборка заготовок ГВС при помощи сварки. В сравнении с методами обработки давлением, сварка наиболее экономичный процесс получения заготовки, который заключается в соединении продольным швов листовых заготовок с требуемой толщиной стенки на оправке формирующего приспособления. В результате процесс изготовле-

ния заготовок ГВС по количеству операций сократится с 6–8 многодневных циклов, включающих по несколько операций и переходов, до 3 операций, состоящих из травления заготовок перед сваркой, сборку под сварку и сварку, без учёта операций по транспортировке и комплектации, занимающих в общей сложности не более 4 ч.

Предварительно перед проведением серии экспериментальных работ по сварке образцов определены способы, виды и предварительные режимы сварки, основанные на теоретическом анализе свариваемости материала и расчете погонной энергии, необходимой для достижения требуемого проплава. Также учтены требования конструкторской документации, связанные с толщиной детали и полем допуска 0,1 мм на геометрические размеры внутренних каналов волноводов.

Анализ свариваемого материала

Выполнен анализ свариваемости материала ГВС из медного сплава. Медь и ее сплавы по сравнению с другими металлами, например, нержавеющей сталью, обладают высокой адсорбционной способностью, вследствие чего для снижения пористости в наплавленном металле при сварке меди и ее сплавов требуется особенно тщательная подготовка поверхности, а также надежная защита сварного соединения в процессе сварки. Основой сплава БрБ2 является медь и около 2 % бериллия (см. таблицу), который при взаимодействии с окружающей средой легко окисляется с образованием окислов различных составов, из которых Be_2O_3 имеет $T_{пл} \approx 733$ К и $T_{кип} \approx 2397$ К, по этой причине подходящим видом сварки является сварка в инертных средах [6].

Химический состав БрБ2

Элемент	Fe	Si	Ni	Al	Cu	Pb	Be	Примеси
Содержание, %	до 0,15	до 0,15	0,2–0,5	до 0,15	96,9–98	до 0,005	1,8–2,1	0,5

Анализ методов сварки

Выполнен анализ различных способов изготовления ГВС, соответствующих поставленным задачам. В литературе широко описаны методы сварки тонкостенных оболочек, которые образуются из лент с помощью формующих устройств различных способов сварки кромок этих лент. Анализ литературы показал, что для рассматриваемой конструкции наиболее подходящими могут быть следующие виды сварки: контактная шовная, микроплазменная, электронно-лучевая, дуговая сварка в среде защитного газа неплавящимся электродом, а также лазерная [7].

Как известно, контактно шовная сварка (КШС) является сложным термомеханическим процессом, при котором нагрев и расплавление металла деталей, сжатых роликами, осуществляется за счет теплоты, выделяемой током на сопротивлении участка электрод – электрод [8]. Произвести сварку может позволить оборудование (МШК-2002ЭК), которое предназначено для шовной сварки деталей из цветных металлов и их сплавов толщиной от 0,05 до 0,4 мм.

Способ КШС обладает несколькими недостатками:

- образование нахлёста после сварки ведет к наличию неоднородности во внутреннем канале в виде несплавленной кромки, влияющей на качество металлического покрытия ГВС и впоследствии на качество радиосигнала;
- сложность обеспечения сборки кромок под сварку;
- выполнение сечений заготовок меньше 60 x 30 не представляется возможным, так как вызывает значительное затруднения по обеспечению прямолинейности формирующей оправки малого сечения из-за усилия, создаваемого электродами.

Следующим рассматриваемым видом сварки является электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Технология заключается в электронной бомбардировке материалов в вакууме, который является необходимым условием устойчивого проведения процесса сварки [9].

Анализ способа показал, что внедрение процесса ЭЛС на предприятии сопровождается высокой трудоёмкостью вспомогательных операций, что снижает технико-экономическую эффективность процесса. Другим недостатком является высокая стоимость комплекта оборудования, составляющая от 2-х десятков млн руб.

В литературе описаны способы по сварке деталей из цветных металлов толщиной до 0,2 мм в импульсном режиме в среде защитного газа аргона как микроплазменной, так и дуговой сваркой неплавящимся электродом. Микроплазменная сварка характеризуется более концентрированной удельной энергией за счет использования сжатой дуги [10; 11].

Рассматривая дуговую и микроплазменную сварку можно сделать предположение о возможности получения качественного сварного соединения с минимальными затратами на оборудование и трудоёмкость операций.

Лазерная сварка обладает высоким значением погонной энергии и по этому показателю существенно превосходит другие способы сварки. В отличие от дуги и плазмы, лазерный луч имеет большую стабильность процесса вследствие относительной простоты управления энергетическими характеристиками лазерного излучения [12].

Расчет режимов сварки

Проведен анализ тепловых процессов, протекающих при формировании сварного соединения. Так, расчетно-аналитическим методом определены ориентировочные режимы тепловложения, необходимого и достаточного для формирования сварного соединения требуемых габаритов. Для расчета тепловых процессов заготовок ГВС определены условия, при которых достигается требуемое формирование сварного шва. Модель нагреваемого тела – тонкостенная цилиндрическая оболочка, которая может быть приравнена с достаточной степенью достоверности к модели нагрева пластины при помощи мгновенного линейного источника теплоты. Использование мгновенного линейного источника обосновывается размерами сварного шва (ширина менее 1 мм и глубина проплавления 0,2 мм), высокой теплопроводностью бериллиевой бронзы в сравнении с теплопроводностью стальной клиновой оправки, на которой формируется сварное соединение, и интенсивным обдувом защитным газом места сварки. Учитывая эти факторы, пренебрегая фактором распространения теплоты в пластине с поверхностной теплоотдачей, количество вводимой теплоты выражаем формулой [13]

$$\Delta T = \frac{Q / \delta}{4\pi c \rho a t} e^{-r^2/4at}, \quad (1)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние до рассматриваемой точки от начала координат, где была введена теплота Q ; δ – толщина пластины; ΔT – приращение температуры в рассматриваемой точке с координатами x, y, z ; t – время, отсчитываемое с момента введения теплоты; ρ – плотность тела в нормальных физических условиях; c – удельная теплоёмкость; $a = \lambda / (c\rho)$ – коэффициент температуропроводности.

Находим количество теплоты, нужного для формирования точечного сварного соединения

$$Q = \frac{4\pi a t \delta c \rho \Delta T}{e^{-r^2/4at}}. \quad (2)$$

Полученное значение количества теплоты составляет 3,9184 Дж.

Используя формулу (3) расчета эффективной тепловой мощности, дуги находим ориентировочные режимы для дуговой и микроплазменной сварки в среде защитного газа аргона [14].

$$q_{эф} = 0,24IU\eta, \quad (3)$$

где I – сила тока; U – напряжение дуги; η – КПД дуги (при дуговой сварке коэффициент 0,5–0,6; при микроплазменной сварке коэффициент 0,6–0,8; при лазерной сварке коэффициент 0,6–0,8).

Ориентировочные режимы дуговой сварки в среде защитного газа: $I \approx 2,47$ А; $U = 11$ В. Для микроплазменной $I \approx 1,85$ А; $U = 11$ В.

Режимами для лазерной сварки являются: плотность мощности излучения, скорость сварки и коэффициент перекрытия.

Значение плотности на площадь обработки [15]

$$E = \frac{4W\tau}{\pi d^2}, \quad (4)$$

где W – энергия импульса; d – диаметр точки; τ – длительность импульса.

Полученное значение $1,1 \cdot 10^6$ Вт/см².

Скорость сварки при коэффициенте перекрытия $k = 0,6$

$$v_{св} = df(1 - k), \quad (5)$$

где f – частота следования импульсов (10 Гц).

Значение скорости сварки 12 мм /мин.

Из характеристик сварочного оборудования и расчетно-аналитических исследований установлены режимы сварки, однако в [14; 15] указано, что при использовании лазерной и микроплазменной сварки тонкостенных обечаек возможно удовлетворительное формирование сварного соединения, тогда как при дуговой сварке есть вероятность получения дефектов из-за неустойчивости сварочной дуги при требуемом токе. Вывод косвенно подтверждается практическим опытом, полученным на одном из отечественных предприятий, специализирующихся на разработке и производстве радиолокационных комплексов, где производится автоматическая дуговая сварка заготовок ГВС толщиной 0,5 мм из медных сплавов с коэффициентом брака деталей $\approx 0,5$.

Далее была выполнена работа, направленная на подтверждение аналитических расчетов путём физического моделирования, включающая в себя сварку образцов заготовок ГВС на различном оборудовании (рис. 1). На установке для сварки обечаек с УСПШН (производитель ООО «НПФ-ИТС», г. Санкт-Петербург) с источником дуговой сварки в среде защитного газа аргона фирмы Miller модель Dynasty 210. Микроплазменная сварка обеспечивалась на установке SWD (Seam Welding Device, Австрия) с источником PMI-50 (производитель фирма SBI, Австрия). Сопровождение лазерной сварки осуществлялась на установке HTS PORTAL 150 (производитель ОКБ «Булат», г. Зеленоград).

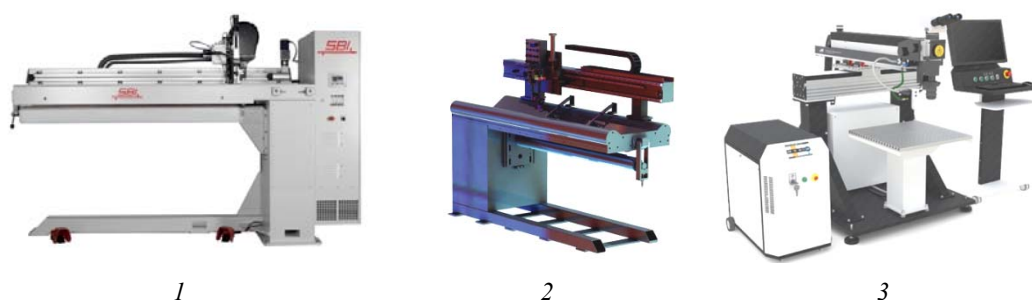


Рис. 1. Установки для сварки:

1 – установка SWD; 2 – установка УСПШН; 3 – установка для лазерной сварки HTS PORTAL 150

Fig. 1. Welding installations:

1 – installation of SWD; 2 – installation of USPSHN; 3 – installation for laser welding HTS PORTAL 150

В ходе работ были сварены 30 образцов пластин 100 x 200 толщиной 0,1 мм по 10 на каждый вид сварки (рис. 2). Пластины сваривались с полным проплавлением. Основными критериями при оценке сварных соединений являлись прочностные характеристики и соответствие требованиям отраслевой нормативно-технической документации в части качества сварки.

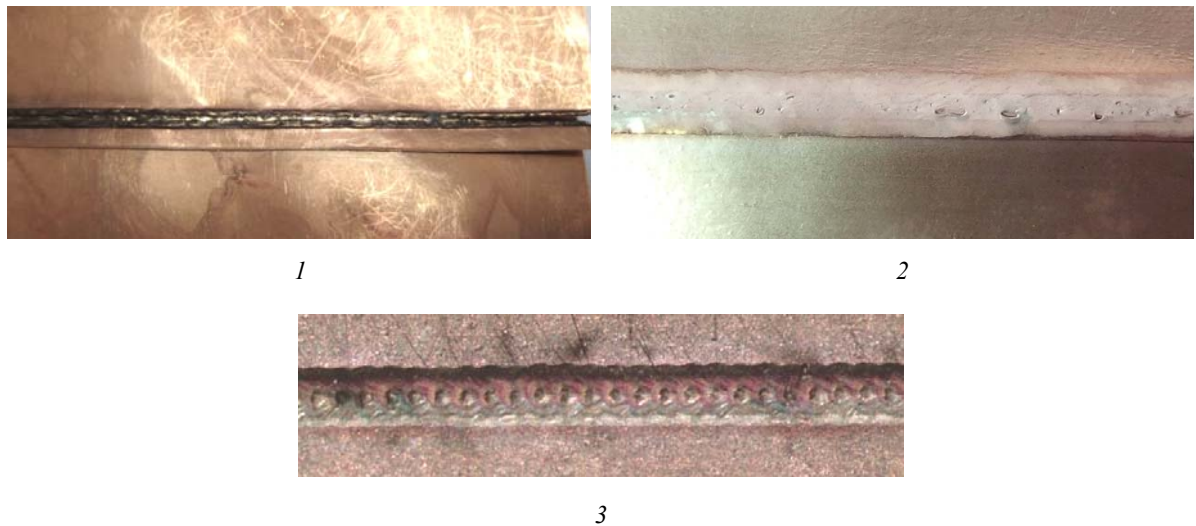


Рис. 2. Образцы сварных соединений:
 1 – дуговая сварка в среде защитного газа неплавящимся электродом;
 2 – микроплазменная сварка; 3 – лазерная сварка

Fig. 2. Samples of welded joints:
 1 – arc welding in a protective gas environment with a non–melting electrode;
 2 – microplasma welding; 3 – laser welding

Внешний визуальный осмотр образцов, сваренных дуговой и микроплазменной сваркой, выявил дефекты в виде прожогов и непроваров у 70 % образцов. Удовлетворительные результаты показала лазерная сварка на 95 % образцов. На 5 % встречались дефекты в виде прожогов, вызванных недостаточным прилеганием свариваемых кромок во время сборки в приспособлении. Образцы, выполненные дуговой и микроплазменной сваркой были забракованы и в дальнейшем в исследованиях участие не принимали.

На оставшихся образцах, выполненной лазерной сваркой, проводились испытания на разрыв шириной образцов 15 мм (рис. 3).

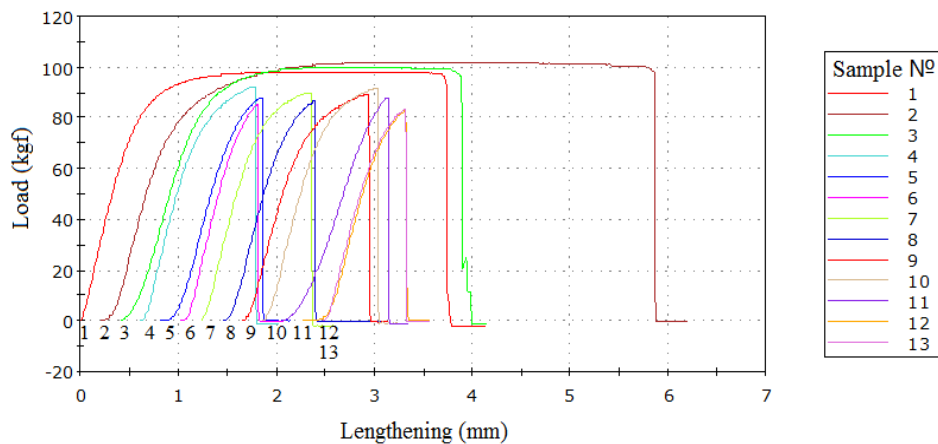


Рис. 3. График нагрузки на разрывной машине

Fig. 3. Load graph on the breaking machine

Образцы с 1 по 3 – основной металл заготовки со средним значением предела прочности 654 МПа (нагрузка 100 kgf).

Образцы с 4 по 13 – образцы сварного соединения со средним значением предела прочности 575 МПа (нагрузка 88 kgf), что соответствует $0,8\sigma_b$ пределу прочности основного металла.

Разрушение образца в зоне термического влияния сварного соединения.
Металлографический анализ (рис. 4) подтвердил требуемое качество сварных швов.

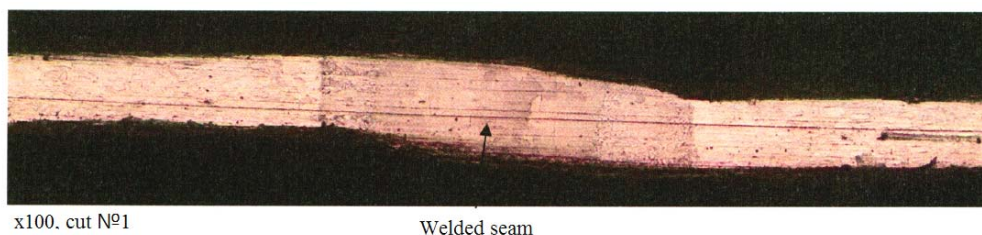


Рис. 4. Металлография сварного соединения

Fig. 4. Metallography of the welded joint

Заключение

В результате работы были сделаны следующие выводы: получение качественного сварного соединения из бериллиевой бронзы толщины 0,1 мм возможно при использовании импульсной лазерной сварки. Микроплазменная и дуговая сварка не обеспечивают требуемую стабильность дуги на малых токах, необходимых для формирования соединения изделий из бронзы, с толщиной кромок 0,1 мм и может приводить к образованию неконтролируемых прожогов и несплавления свариваемых кромок.

В настоящее время на предприятии АО «ИСС» внедрена технология изготовления ГВС с толщиной 0,1 мм из медного сплава БрБ2 ДПРНМ ГОСТ1789-13, сечений от 20×10 до 70×30.

Использование заготовок, полученных при помощи импульсной лазерной сварки, позволяет в разы уменьшить трудоёмкость, что снижает стоимость производства и повышает конкурентные преимущества волноводной продукции АО «ИСС» и при этом обеспечивает её эксплуатационные характеристики на уровне лучших мировых аналогов.

Библиографические ссылки

1. Волноводный тракт высокого уровня мощности Ка-диапазона с полосой 1 ГГц / А. А. Богданов и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2015. № 10 (58). С. 867–880.
2. Метод изготовления волновода с токопроводящим вакуумным покрытием / И. И. Хоменко, Д. В. Раводина, А. Е. Михеев и др. // Вестник СибГУ. 2015. № 3 (16). С. 690–694.
3. Зуев Р. С., Зуева О. А. Сущностные характеристики методов изготовления волноводов в реальном секторе хозяйства // Globus. Военные науки. 2020. С. 16–19.
4. Анализ технологичности деталей гибких волноводных секций космического аппарата / С. В. Косьяненко, Е. В. Патраев, В. В. Петрусев, И. В. Трифанов // Известия вузов. Машиностроение. 2021. № 12 (741). С. 53–61.
5. Морозов И. С., Трофимова М. А., Уханёв С. А. Разработка гибких волноводных секций для антенных систем субмиллиметрового диапазона космических аппаратов связи // Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 150–151.
6. Технология металлов и сплавов / под ред. Н. Н. Сергеева. Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. 490 с.
7. Теория сварочных процессов / под ред. В. М. Нервного. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 702 с.
8. Брежнева А. В., Яночкин В. А. Контактная сварка и ее основные способы // Решетневские чтения. 2018. Т. 1 (14). С. 414–416.
9. Моделирование режима электронно-лучевой сварки тонкостенной конструкций из сплава АД31 / С. О. Курашкин, Ю. Н. Серегин, В. С. Тынченко и др. // Вестник СибГУ. 2022. № (23). С. 296–303.
10. Особенности формирования сварных швов при плазменной сварке торцевых соединений габаритных изделий из меди / Ю. Д. Щицын и др. // Вестник ПНИПУ. 2022. № 3 (24). С. 71–79.

11. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 406 с.
12. Банов М. Д. Специальные способы сварки и резки. М. : Академия, 2009. 208 с.
13. Антонов Ю. А., Кожухов В. С., Зоркин А. Я. Моделирование тепловых процессов аргондуговой сварки меди // Вестник науки. 2019. № 6 (15). С. 291–297.
14. Tomasz Kik. Heat Source Models in Numerical Simulations of Laser Welding // PubMed. 2020. № 13 (11). 24 p.
15. Рахимов Р. Р., Звездин В. В. Технологические особенности лазерной сварки металлических изделий // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2020. № 2 (85). С. 29–36.

References

1. Bogdashov A. A. [High-power waveguide path of the Ka-band with a band of 1 GHz]. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 2015, Vol. 10, No. 58, P. 867–880 (In Russ.).
2. Khomenko I. I., Ravodina D. V., Mikheev A. E., Eresko T. T., Eresko S. P. [Method for manufacturing a waveguide with a conductive vacuum coating]. *Vestnik SibGU*. 2015, Vol. 3, No. 16, P. 690–694 (In Russ.).
3. Zuev R. S., Zueva O. A. [Essential characteristics of methods for manufacturing waveguides in the real sector of the economy]. *Globus. Voennye nauki*. 2020, P. 16–19 (In Russ.).
4. Kos'yanenko S. V., Patraev E. V., Petrushev V. V., Trifanov I. V. [Analysis of manufacturability of parts of flexible waveguide sections of a spacecraft]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Mashinostroenie*. 2021, No. 12 (741), P. 53–61 (In Russ.).
5. Morozov I. S., Trofimova M. A., Ukhanev S. A. [Development of flexible waveguide sections for antenna systems of the submillimeter range of space communication devices]. *Reshetnev readings*. 2018, Vol. 1, P. 150–151 (In Russ.).
6. *Tekhnologiya metallov i splavov* [Technology of metals and alloys]. Ed. by N. N. Sergeev. Tula. TulGU Publ., 2017, 490 p.
7. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Ed. by V. M. Nerovnyy. Moscow, MGTU Publ., 2016, 702 p.
8. Brezhneva A. V., Yanochkin V. A. [Contact welding and its main methods]. *Reshetnev readings*. 2018, Vol. 1, P. 414–416 (In Russ.).
9. Kurashkin S. O., Seregin Yu. N., Tynchenko V. S., Murygin A. V., Kotel'nikova S. V. [Modeling of the mode of electron-beam welding of thin-walled structures made of alloy AD31]. *Vestnik SibGU*. 2022, Vol. 2, No. 23, P. 296–303 (In Russ.).
10. Shchitsyn Yu. D. [Features of the formation of welds during plasma welding of end joints of overall copper products]. *Vestnik PNIPU*. 2022, Vol. 24, No. 3, P. 71–79 (In Russ.).
11. Sosnin N. A., Ermakov S. A., Topolyanskiy P. A. *Plazmennyye tekhnologii* [Plasma technologies]. Sankt-Peterburg, SPbPU Publ., 2013, 406 p.
12. Banov M. D. *Spetsial'nye sposoby svarki i rezki* [Special welding and cutting methods]. Moscow, Akademiya Publ., 2009, 208 p.
13. Antonov Yu. A., Kozhukhov V. S., Zorkin A. Ya. [Modeling of thermal processes of argon-arc welding of copper]. *Vestnik nauki*. 2019, Vol. 15, No. 6, 291–297 p (In Russ.).
14. Tomasz Kik. Heat Source Models in Numerical Simulations of Laser Welding. *PubMed*. 2020, No. 13 (11), 24 p.
15. Rakhimov R. R., Zvezdin V. V. [Technological features of laser welding of metal products]. *Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya*. 2020, Vol. 85, No. 2, P. 29–36 (In Russ.).

Вервейко Дмитрий Сергеевич – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий. E-mail: verveykods@iss-reshetnev.ru.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Злобин Сергей Константинович – кандидат технических наук, начальник сектора технологий сварки и пайки – главный сварщик; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zsk@iss-reshetnev.ru.

Гусев Виктор Юрьевич – ведущий инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vic@iss-reshetnev.ru.

Патраев Евгений Валерьевич – заместитель генерального директора – начальник производства; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: evpatraev@iss-reshetnev.ru.

Михнёв Михаил Михайлович – кандидат технических наук, главный технолог; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mix@iss-reshetnev.ru.

Dmitry Sergeevich Verveiko – postgraduate; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: verveykods@iss-reshetnev.ru.

Murygin Alexander Vladimirovich – Dr. Sc., Head. Department of information management systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avm514@mail.ru.

Sergey Konstantinovich Zlobin – Cand. Sc., Head of the Welding and Soldering Technologies Sector – Chief welder; Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”. E-mail: zsk@iss-reshetnev.ru.

Gusev Viktor Yurievich – Leading engineer; Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”. E-mail: vic@iss-reshetnev.ru.

Patraev Evgeny Valerievich – Deputy General Director for Production; Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”. E-mail: evpatraev@iss-reshetnev.ru.

Mikhnev Mikhail Mikhailovich – Cand. Sc., Chief Technologist; Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”. E-mail: mix@iss-reshetnev.ru.
