

После проведения сеанса ретрансляции информация транслируется от приемной ЗС в АПКО и далее конечному потребителю, а в ЦУРС транслируется вся отчетная информация по проведенному сеансу связи.

В работе приведено описание системы МКСР «Луч», приведена баллистическая схема размещения ретрансляционных КА на геостационарной орбите, построены зоны радиовидимости для минимально допустимых значений углов места работы земных станций $\gamma_{\text{мин}}$, равных 5, 10, 15°.

Построена схема организации, а также описана логика функционирования сквозного тракта организации телемостов.

Библиографические ссылки

1. Тактико-техническое задание на разработку и создание многофункциональной космической системы ретрансляции «Луч» с геостационарными космическими аппаратами космического комплекса «Луч-М». 2002 г.
2. ТТЗ «Создание многофункциональной космической системы ретрансляции «Луч» с 3-мя космическими аппаратами на геостационарной орбите». Дополнение № 7, 2012 г.
3. Основные характеристики МКСР «Луч» и основные положения по взаимодействию аппаратуры

абонентов и бортовых ретрансляционных комплексов КА «Луч-5А», «Луч-5Б» и «Луч-5В». Железногорск, ОАО «ИСС» им. академика М. Ф. Решетнева, 2012.

References

1. *Taktiko-tehnicheskoye zadaniye na razrabotku i sozdaniye mnogofunktional'noy kosmicheskoy sistemy retranslyatsii "Luch" s geostatsionarnymi kosmicheskimi apparatami kosmicheskogo kompleksa "Luch-M"* (Performance task for design and making multifunctional space system relaying "Luch" with geostationary space crafts of space complex "Luch-M"). 2002.
2. *TTZ "Sozdaniye mnogofunktional'noy kosmicheskoy sistemy retranslyatsii "Luch" s 3-mya kosmicheskimi apparatami na geostatsionarnoy orbite"* (Performance task "Making multifunctional space system relaying "Luch" with three space crafts located on geostationary orbit". Addendum number 7, 2012.
3. *Osnovnyye kharakteristiki MKSR "Luch" i osnovnyye polozheniya po vzaimodeystviyu apparatury abonentov i bortovykh retranslyatsionnykh kompleksov KA "Luch-5A", "Luch-5B" i "Luch-5V"* (Basic descriptions MSSR "Luch" and basic regulations of equipment consumers and board relaying systems satellite "Luch-5A", "Luch-5B" and "Luch-5V" interaction). Geleznogorsk, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems", 2012.

© Громов К. В., Выгонский Ю. Г., Роскин С. М., Кузовников А. В., Мухин В. А., 2013

УДК 621.372.83.001.24

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ВОЛНОВОДНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. К. Злобин¹, М. М. Михнев¹, В. Д. Лаптенко², А. Н. Бочаров², Б. Б. Долгополов³

¹ ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

² Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

³ ООО «Эком»

Россия, 660048, Красноярск, ул. Брянская, 360. E-mail: ius_bocharov@sibsau.ru

Показаны особенности производства тонкостенных волноводно-распределительных трактов космических аппаратов с применением индукционной пайки. Рассмотрены вопросы отработки технологии индукционной пайки волноводных трактов в условиях узкого диапазона разброса температур, неравномерного нагрева по контуру. Для отработки технологии индукционной пайки используется технологический комплекс, содержащий индукционную установку и стенд управления на базе промышленного компьютера с регистрацией температур в контрольных точках паяных соединений. В результате исследований доработаны конструкции индукторов, в результате чего приближены зоны максимального нагрева к зонам пайки. Внедрение технологии индукционной пайки позволило снизить массогабаритные характеристики волноводов и обеспечить требуемые электрические характеристики. Указаны пути совершенствования технологии индукционной пайки волноводных трактов.

Ключевые слова: индукционная пайка, волноводный тракт, индуктор, температурное поле, индукционная установка, стенд управления, промышленный компьютер, термопара.

THE FEATURES OF PRODUCTION OF WAVEGUIDE-DISTRIBUTIVE SYSTEMS OF COMMUNICATION SPACECRAFTS

S. K. Zlobin¹, M. M. Michnev¹, V. D. Laptanok², A. N. Bocharov², B. B. Dolgopolov³

¹ JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev
52 Lenin str., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

² Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia

³ LLC "Ekom", Russia, Krasnoyarsk
360 Bryanskaya str., Krasnoyarsk, 660048, Russia. E-mail: ius_bocharov@sibsau.ru

The problems of production of thin-walled waveguide-distributive systems of spacecrafts with application of the induction brazing are shown. Questions of development of induction brazing technology of the waveguide tracts under condition of the narrow range of temperatures dispersion, uneven heating on a contour are considered. For development of induction brazing technology the technological complex containing induction apparatus and the control stand based on the industrial computer with registration of temperatures in control points of solder connections is used. As a result of researches designs of inductors are finished. Therefore, zones of the maximum heating are approached to soldering zones. Introduction of induction brazing technology allowed to lower mass-dimensional characteristics of wave guides and to provide demanded electric characteristics. Ways of improvement of induction brazing technology of the waveguide paths are specified.

Keywords: induction brazing, waveguide tract, inductor, temperature field, induction apparatus, control stand, industrial computer, thermopair.

В аэрокосмической промышленности жесткие ограничения по массе летательных аппаратов обуславливают применение различных элементов модулей полезных нагрузок с оптимальными массогабаритными характеристиками. Это относится и к волноводным трактам антенно-фидерных устройств космических аппаратов (АФУ КА) (рис. 1). При этом надежность элементов должна быть достаточно высокой для обеспечения их функционирования в течение всего срока активного существования, который для современных космических аппаратов связи составляет 12–15 лет.

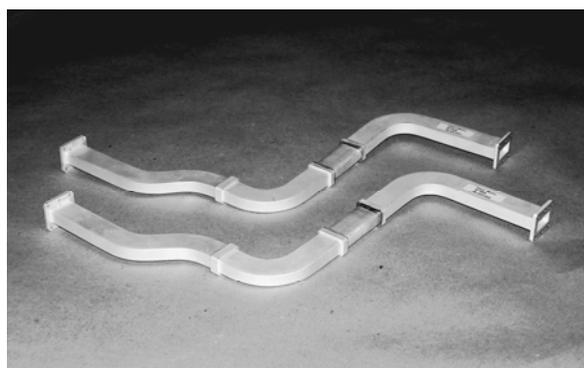


Рис. 1. Волноводные тракты АФУ КА, производства ОАО «ИСС», с улучшенными массогабаритными и электротехническими параметрами

Волноводная система является одним из видов линий передачи электромагнитной энергии. Ее отличает:

- 1) возможность передачи большой мощности;
- 2) простота конструкции;
- 3) широкое применение в радиотехнике сверхвысоких частот.

По волноводу могут распространяться различные типы электромагнитных волн. Преимущественное распространение волн того или иного типа зависит от геометрических размеров волновода, частоты возбуждаемых электромагнитных колебаний и метода их возбуждения.

Основное целевое назначение системы волноводных трактов в конструкции КА состоит в обеспечении функционирования космического аппарата и его бортовых систем в соответствии с заданной программой функционирования, зафиксированной в технологических циклах.

Одной из приоритетных задач, стоящих в настоящий момент перед ОАО «ИСС» им. академика М. Ф. Решетнева, является освоение производства тонкостенных волноводно-распределительных трактов из алюминиевых сплавов с улучшенными массогабаритными и электротехническими параметрами.

При сборке элементов волноводных трактов из алюминиевых сплавов в ОАО «ИСС» применяется пайка с применением источника индукционного нагрева [1].

Поэлементная сборка облегченных волноводных трактов, с применением метода индукционной пайки, связано с рядом технологических сложностей.

Неравномерное распределение температурных полей, являющееся следствием разнотолщинности паяемых изделий, а так же особенностей конструкции индукторов, представляет наибольшую сложность при отработке и последующем воспроизведении технологических параметров процесса индукционной пайки.

Относительно небольшая разница температуры плавления припоя СВАК12 (577–580 °С) и температуры плавления основного материала АД31 паяемых

волноводных труб, муфт и фланцев (659–663 °С), при средней скорости индукционного нагрева 20–25 °С/сек., требует точной отработки и воспроизведения технологических режимов процесса пайки и, как следствие, высокой квалификации персонала.

Учитывая то, что из-за некоторых особенностей индукционного нагрева [2], зоны с максимальной плотностью индуцированных вихревых токов, а, следовательно, и зоны наибольшего тепловыделения (зоны максимального нагрева) в сечениях паяемых элементов волноводных трактов не совпадают с зонами пайки (рис. 2), необходимо выполнять ряд условий для получения качественных паяных соединений:

– температура в зонах максимального нагрева (далее ЗМН) паяемых элементов должна быть менее температуры их плавления;

– разница температур в ЗМН на различных паяемых элементах не должна превышать 10 °С;

– температура в ЗМН паяемых элементов не должна отличаться более чем на 10 °С от температуры в зоне пайки.

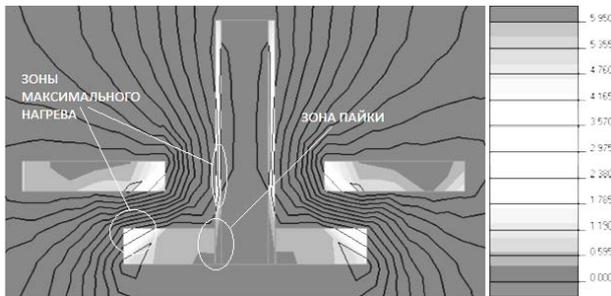


Рис. 2. Нагрев волноводной трубы и фланца с применением плоского индуктора. Действующее значение плотности тока $i_{\text{полн.}}$ (10^7 A/m^2)

Выполнение вышеуказанных условий необходимо для стабилизации процесса индукционной пайки, а так же для предотвращения перегрева и, как следствие, разрушения паяемых изделий.

Кроме того, температура, контактирующих с припоем участков нагреваемых изделий в зоне пайки, не должна быть ниже температуры плавления припоя. В противном случае расплавленный припой, не смочив поверхности, может быть вытеснен электродинамическими силами поля из зоны пайки

Для выполнения всех вышеперечисленных условий получения качественных паяных соединений необходимо с особым вниманием отнестись к выбору оборудования, а так же к отработке и воспроизведению основных параметров технологических режимов нагрева при пайке.

Созданное в ОАО «ИСС» рабочее место индукционной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов, включающее в себя установку пайки (рис. 3) и стенд управления, позволяет с необходимой точностью воспроизводить требуемые технологические параметры нагрева.

Установка пайки состоит из генератора высокой частоты (66 кГц), согласующего устройства, набора

плоских индукторов с рабочими окнами прямоугольного сечения, манипулятора-позиционера.

Стенд управления предназначен для настройки и автоматического регулирования технологических параметров поста индукционного нагрева в процессе пайки элементов волноводных трактов. Программное обеспечение Стенда позволяет производить запись, корректировку и воспроизведение основных технологических параметров процесса пайки (функциональная схема Стенда приведена на рис. 4).

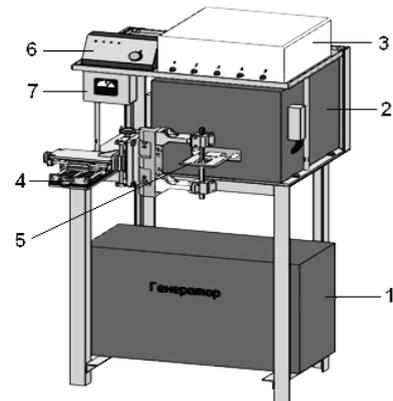


Рис. 3. Установка пайки:

1 – генератор; 2 – согласующее устройство; 3 – блок управления постом пайки волноводов; 4 – манипулятор – позиционер; 5 – индуктор; 6 – пуль управления; 7 – амперметр

Стенд состоит из следующих элементов: управляющего компьютера с соответствующим программным обеспечением, многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Цифровой управляющий сигнал выдается компьютером и преобразуется ЦАП в управляющее напряжение в диапазоне 0–10 В, управляющее мощностью генератора. Изменение мощности генератора позволяет управлять скоростью нагрева изделий. Стенд позволяет в режиме реального времени регистрировать изменение температуры в 4-х различных точках нагреваемого объекта.

Отработка технологических параметров (позиция паяемых деталей относительно индуктора, мощность, подаваемая на индуктор) так же производится при помощи Стенда.

Для исследования процесса нагрева и пайки используются термоэлектрические преобразователи – термопары. В исследуемый образец-имитатор термопары устанавливаются в точках, указанных на рис. 5.

Точки установки термопар на фланце расположены таким образом, чтобы контролировать нагрев непосредственно в зоне пайки ($t_{\text{р1}}$), а так же в зонах максимального нагрева ($t_{\text{р2}}$, $t_{\text{р3}}$, $t_{\text{р4}}$). При этом, для обеспечения условий качественной пайки 1–4, мгновенные значения температур в наблюдаемых точках должны распределяться таким образом, чтобы при температуре пайки (577–590 °С) выполнялось следующее неравенство:

$$t_{\text{р1}} \text{ °C} > t_{\text{р2}} \text{ °C} = t_{\text{р3}} \text{ °C} = t_{\text{р4}} \text{ °C} \quad (1)$$

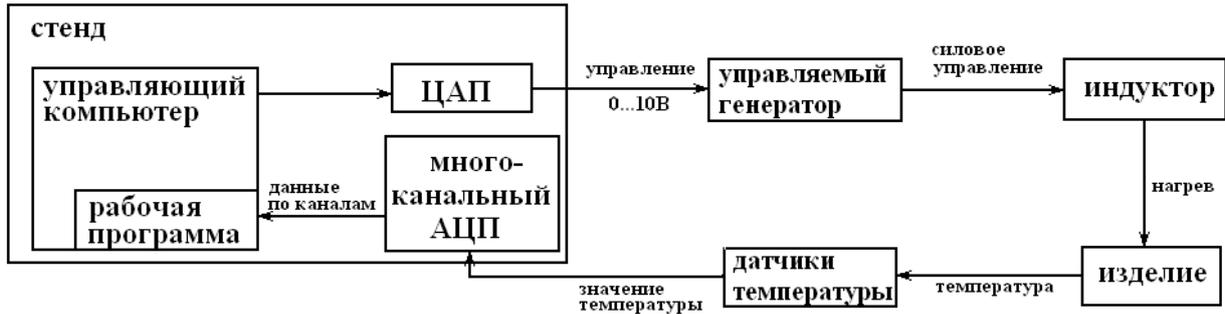


Рис. 4. Функциональная схема стенда управления постом пайки волноводных трактов

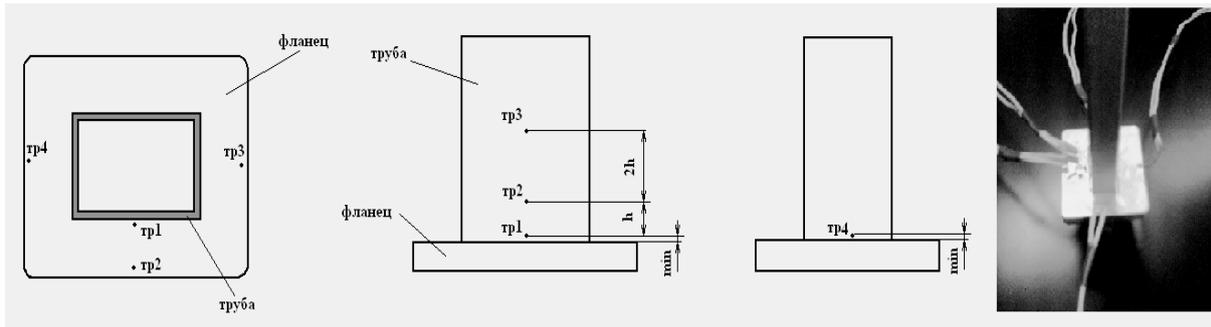


Рис. 5. Схема установки термодпар. Образец-имитатор волноводная труба-фланец

На трубе термодпары в точках тр1 и тр4 необходимы для контроля температуры в зоне пайки и по ее периметру, а в точках тр2 и тр3 для контроля нагрева трубы по высоте. Для трубы, при температуре пайки, должно выполняться следующее неравенство:

$$t_{тр1}^{\circ C} = t_{тр4}^{\circ C} > t_{тр2}^{\circ C} > t_{тр3}^{\circ C} \quad (2).$$

При этом температуры в точках тр1 фланца и тр1 волноводной трубы должны быть примерно одинаковыми ($\pm 5^{\circ C}$). Графический интерфейс программного обеспечения Стенда позволяет оператору в режиме реального времени отслеживать изменение температур в исследуемых точках нагреваемого объекта (рис. 6).

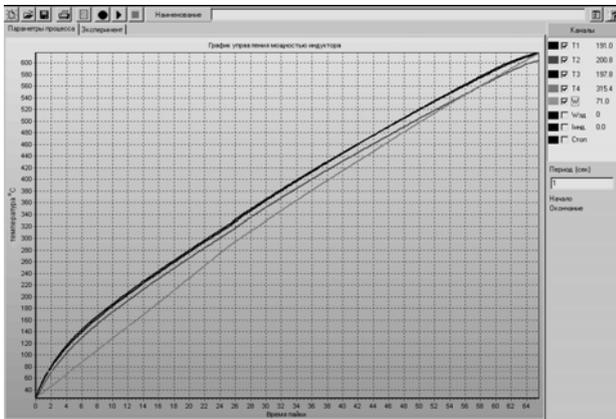


Рис. 6. Нагрев волноводной трубы и фланца. T1 – тр1 труба; T2 – тр2 труба; T3 – тр4 труба; T4 – тр1 фланец

Выполнение неравенств (1) и (2) обеспечивается подбором соответствующей формы индуктора, мощности подаваемой на индуктор и позиционирования нагреваемого объекта относительно индуктора.

Однако, описанный выше, способ пригоден лишь для отработки технологических параметров процесса индукционной пайки на образцах-имитаторах, поскольку использовать термодпары при изготовлении штатной продукции невозможно.

Автоматическое воспроизведение усредненных значений технологических параметров процесса индукционной пайки при помощи программного управления, без использования надежной системы обратной связи, не представляется возможным по следующим причинам:

1) допуски на размеры элементов волноводно-распределительных трактов фактически приводят к разнице в массах одноименных изделий. Так для фланцев отклонение по массе составляет до 1,5 %, а для волноводных труб – до 25 %, и это приводит к значительным отклонениям во времени пайки на программируемом режиме. Так при пайке фланцев толщиной $6,5^{+0,1}$ мм и волноводных труб, с сечением внутреннего канала $19 \times 9,5$ мм и толщиной стенки $1^{\pm 0,1}$ мм, данное отклонение приблизительно составляет 5 с;

2) при учете отклонений технологического процесса пайки по времени (5–7 с), и совокупном рассмотрении таких факторов, как средняя скорость индукционного нагрева ($20\text{--}25^{\circ C/c}$), время от начала плавления припоя до полного заполнения им техно-

гического зазора между паяемыми элементами (1–2 с), разность температур между ЗМН и зоной пайки (до 10 °С), относительно небольшой разницы температуры плавления припоя и температуры плавления основного металла паяемых элементов (60–70 °С), вероятность образования неисправимых дефектов паяных соединений превышает 30 %.

Поэтому в настоящее время процесс пайки осуществляется при участии оператора.

С помощью ЭВМ программируется изменение во времени мощности источника индукционного нагрева. Прекращение процесса пайки производится оператором по визуальной информации.

Производимая в настоящее время модернизация установки пайки позволит минимизировать влияние, перечисленных выше, факторов.

Модернизация установки пайки ведется в двух направлениях.

Во-первых, оптимизируется система «индуктор – нагреваемый объект», путем разработки и внедрения индукторов оптимальной конфигурации для нагрева конкретных изделий. Так форма профиля индуктирующего провода, изображенная на рис. 7, позволяет локализовать и максимально приблизить зону максимального нагрева к зоне пайки на изделии.

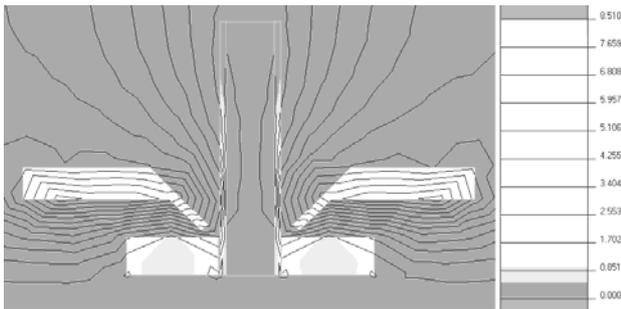


Рис. 7. Нагрев волноводной трубы и фланца с применением одновиткового индуктора сложного профиля. Действующее значение плотности тока $i_{\text{полн}}$ (10^7 A/m^2)

Локализация зон максимального нагрева позволяет приблизить индуктор к паяемым изделиям на 1–2 мм, что значительно повышает КПД системы «индуктор – нагреваемое тело». При этом сокращается время пайки на одних и тех же мощности и частоте тока в 1,5–2 раза, по сравнению со временем пайки при применении плоского индуктора (см. рис. 2). Подобное перераспределение температурных зон позволяет увеличить время выдержки с момента начала расплавления припоя до момента полного расплавления, и заполнения им технологических зазоров между паяемыми изделиями, что положительно сказывается на качестве получаемых паяных соединений.

Во вторых, модернизируется система автоматического управления процессом индукционной пайки с использованием обратной связи по температуре, путем применения бесконтактных пирометрических датчиков, с возможностью корректировки технологи-

ческих параметров и выравнивания температуры зон нагрева непосредственно в процессе пайки.

На производстве ОАО «ИСС» внедрена технология сборки поэлементной пайкой облегченных волноводных трактов из алюминиевых сплавов с применением источника индукционного нагрева. Данная технология в сравнении с процессом изготовления волноводов из алюминиевых сплавов с применением аргонодуговой сварки обладает рядом преимуществ, такими как:

- возможность получения неразъемных соединений тонкостенных, прямоугольных волноводных труб, с толщиной стенок в диапазоне 0,5...1,4 мм, со значительно более массивными (толщиной до 7,0 мм) фланцами и муфтами (рис. 8);

- отсутствие концентраторов напряжений в связи с образованием плавной галтели паяного шва позволяет данным соединениям успешно работать в сложных условиях перепада температуры от +120 до –100 °С; вибраций в диапазоне частот от 1,5 до 2500 Гц с ускорением до 12 g;

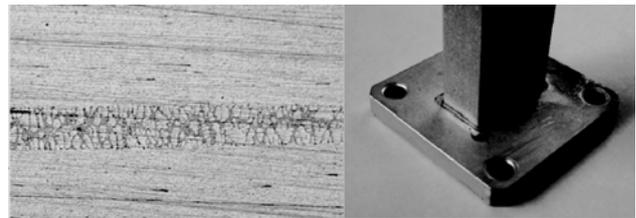


Рис. 8. Участок паяного шва волноводного тракта, $\times 50$

- температура пайки ниже температуры солидус паяемых элементов волноводных трактов;

- отсутствует разупрочнение околшовной зоны, при этом прочность паяного соединения выше прочности волноводных труб;

- улучшение электротехнических параметров волноводно-распределительных трактов (рис. 9, 10);

- снижение массы изделий на 15–20 %, стоимости в 2–2,5 раза.

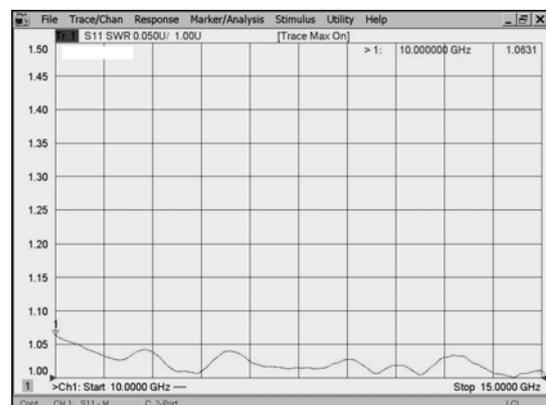


Рис. 9. Значение коэффициента стоячей волны (КСВ) в диапазоне частот 10–15 ГГц не превышает 1,07

В качестве примера конкретной реализации описываемой технологии можно указать созданные в ОАО «ИСС» космические аппараты «ЛУЧ 5А», «ЛУЧ 5Б», «ЯМАЛ 300К». Данные КА укомплектованы облегченными волноводными трактами из алюминиевого сплава, произведенными в ОАО «ИСС» (рис. 11), и в настоящий момент успешно эксплуатируются в интересах различных потребителей.

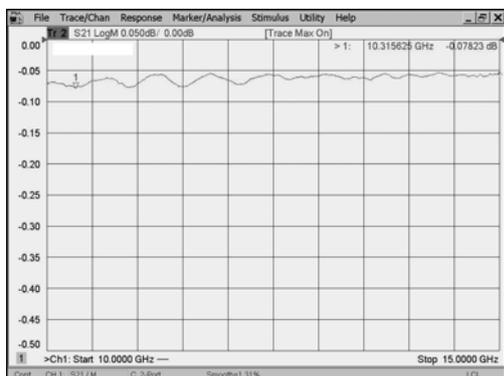


Рис. 10. Значение потерь в диапазоне частот 10–15 ГГц не превышает 0,08 дБ

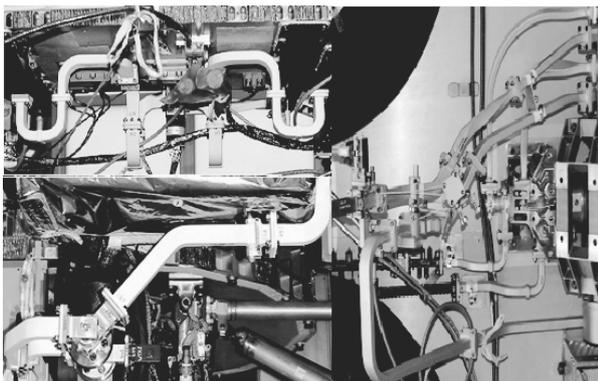


Рис. 11. Волноводные тракты АФУ КА «ЛУЧ 5А», производства ОАО «ИСС», с улучшенными массогабаритными и радиотехническими параметрами

Таким образом:

1. Технология индукционной пайки позволяет получить неразъемные соединения волноводно-распределительных трактов из алюминиевых сплавов, обладающих улучшенными массогабаритными и электротехническими характеристиками.

2. Автоматизировать процесс индукционной пайки волноводов только за счет программирования режимов не удается и поэтому требуется введение обратной связи по температуре в характерных точках паяного соединения.

Библиографические ссылки

1. Пат. № 2317184 Российская Федерация. Способ изготовления волноводно-распределительных систем из алюминиевых сплавов / П. Н. Сильченко, А. И. Корчагин, М. М. Михнев, В. Д. Чупилко, А. Н. Липин, В. Ю. Гусев ; заявитель и патентообладатель СибГАУ № 2005133293/02 ; заявл. 28.10.2005 ; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5.

2. Особенности пайки элементов волноводно-распределительных трактов из алюминиевых сплавов с применением источника индукционного нагрева / С. К. Злобин, М. М. Михнев, В. Д. Лаптенко, Р. В. Зайцев // Решетневские чтения : материалы XVI междунар. научн. конфер. : в 2 ч. Красноярск, 2012. Ч. 1. С. 16–17.

References

1. Patent № 2317184 Russian Federation. *Sposob izgotovleniya volnovodno-raspredelitel'nykh sistem iz alyuminiyevykh spлавov* (Method of production of waveguide-distributive systems from aluminum alloys). P. N. Silchenko, A. I. Korchagin, M. M. Michnev, V. D. Chupilko, A. N. Lipin, V. G. Gusev; claimer and patentee SibSAU. № 2005133293/02 ; applied for 28.10.2005; published 20.02.2008, Bulletin № 5.

2. Zlobin S. K., Michnev M. M., Laptенок V. D., Zaicev R. V. *Materialy XVI mezhhdunar. nauchn. konfer. "Reshetnevskiyе chteniya"* (XVI International Scientific Conference "Reshetnev Readings"). SibSAU, Krasnoyarsk, 2012, ch. 1, p. 16–17.

© Злобин С. К., Михнев М. М., Лаптенко В. Д., Бочаров А. Н., Долгополов Б. Б., 2013