

УДК 621.791.317.1
EDN: FOKPCE

PACS: 85.60.Gz

Исследование свойств вакуумно-плотных паяных соединений, применяемых для изготовления держателей матричных фотоприёмных устройств

© Е. Д. Коротаев^{1,*}, Д. И. Гурьев¹, А. И. Гурьев¹, А. А. Зиньковский¹,
Д. И. Морозов¹, А. А. Шаров^{1,2}¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: korotaevrus@gmail.com

² Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАуК),
Москва, 105064 РоссияСтатья поступила в редакцию 27.10.2025; после доработки 10.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 2.2.6

Исследованы свойства вакуумно-плотных паяных соединений, созданных индукционной пайкой, применяемой для изготовления узлов вакуумных криогенных корпусов охлаждаемых матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) – гильз-держателей. Учтена специфика их конструкции и применения в микрокриогенных системах охлаждения МФПУ. Для контроля скорости натекания по гелию разработана оригинальная оснастка, позволяющая существенно повысить предельную чувствительность гелиевого течеискателя. Скорость натекания по гелию изготовленных образцов корпусов составляет 5×10^{-13} Па·м³/с.

Ключевые слова: индукционная пайка; криогенный корпус; матричное фотоприёмное устройство.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-63-68

Многие типы матричных фотоприёмных устройств инфракрасного диапазона спектра требуют охлаждения фоточувствительного элемента (ФЧЭ), в том числе, до криогенных температур. Для решения задачи обеспечения необходимой рабочей температуры ФЧЭ часто используют микрокриогенные машины, построенные по обратному циклу Стирлинга, которые могут создаваться как в интегральном исполнении, так и по системе Сплит-Стирлинг [1]. Конструктивно охлаждаемое фотоприёмное устройство представляет собой микрокриогенную машину, интегрированную с гильзой-держателем на холодном пальце, которой установлен охлаждаемый ФЧЭ. Гильза-держатель выполняет роль функционального элемента корпуса микрокриогенной машины, внутри которого происходит движение регенератора с поршнем-вытеснителем. Внутренняя полость машины и, соответственно,

гильзы-держателя заполнена рабочим газом (как правило, гелием) под высоким давлением (от 20 до 50 кгс/см²). При этом гильза-держатель одновременно является частью корпуса (криостата) фотоприёмного устройства (как правило, вакуумированного или, реже, газонаполненного).

Таким образом, исходя из функциональных особенностей гильзы-держателя, к нему предъявляются следующие основные требования:

- герметичность;
- стойкость к перепадам температур;
- низкие уровни теплопритоков;
- коррозионная стойкость материалов,

применяемых для изготовления гильз-держателей, а также особые требования к их температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР): для обеспечения геометрической стабильности устройства они долж-

ны быть невелики, а материал площадки для размещения ФЧЭ, кроме того, должен иметь ТКЛР максимально близкий к ТКЛР материала ФЧЭ, чтобы избежать температурных напряжений в их соединении.

Перечисленные требования наилучшим образом обеспечены в типовой конструкции гильзы-держателя, представленной на рис. 1.

Такая гильза-держатель состоит из базовой втулки 1, выполняемой из нержавеющей стали, которая непосредственно соединяется с корпусом микрокриогенной машины, с базо-

вой втулкой соединена гильза 2, которая в целях минимизации теплопритоков выполняется тонкостенной из нержавеющей стали. Концевой элемент 3 гильзы-держателя, на котором непосредственно устанавливается охлаждаемый ФЧЭ представляет собой диск из материала с нормированным значением ТКЛР, например, кобальта или инвара. Форма и размеры гильзы-держателя могут варьироваться в зависимости от параметров конкретного ФЧЭ и используемой микрокриогенной машины.

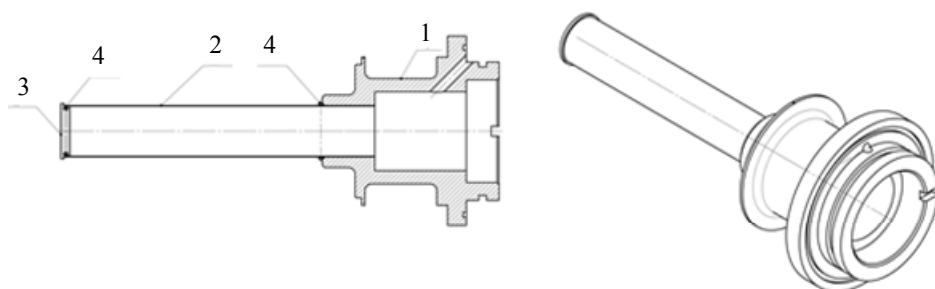


Рис. 1. Конструкция гильзы-держателя: 1 – базовая втулка; 2 – гильза; 3 – концевой элемент; 4 – припой

Одной из важных технологических задач при изготовлении гильз-держателей является обеспечение надёжного соединения элементов гильзы-держателя между собой, гарантирующего выполнение условий герметичности и геометрической стабильности в условиях криогенных температур. Как правило, это может быть достигнуто с применением сварки или пайки. На рис. 1 представлена гильза-держатель, элементы которого соединяются пайкой. Места размещения припоя обозначены на рис. 1 позицией 4.

Для соединения пайкой металлических деталей в производственной практике достаточно часто применяют индукционный нагрев [2], который обеспечивается за счёт возникновения теплового эффекта в соединяемых деталях и припое под действием электромагнитного поля (вихревых токов Фуко).

При этом, в процессе нагрева, если он производится в воздушной атмосфере, неизменно происходит ускоренное окисление поверхностей деталей и припоя, что недопустимо для гильзы-держателя, исходя из специфики её применения, кроме того оно может привести к нарушению герметичности паяного шва.

Специалистами АО «НПО «Орион» в рамках решения задачи изготовления гильз-

держателей проведена отработка создания вакуумплотных паяных соединений способом индукционной пайки, не приводящей к окислению соединяемых деталей.

Для пайки применяется индукционный нагреватель, структурная схема которого представлена на рис. 2.

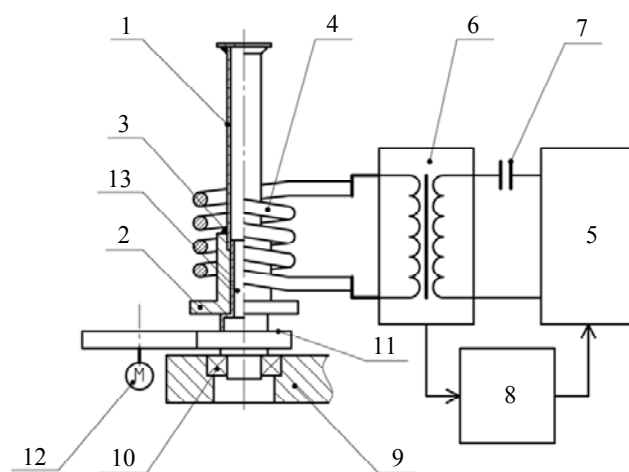


Рис. 2. Схема устройства для индукционной пайки гильз-держателей: 1, 2 – детали гильзы-держателя; 3 – припой; 4 – индуктор; 5 – генератор электрической мощности; 6 – трансформатор; 7 – конденсатор; 8 – автогенератор; 9 – опора; 10 – подшипниковый узел; 11 – поворотная платформа; 12 – привод; 13 – посадочное место

Соединяемые детали гильзы-держателя 1 и 2 и припой 3 помещены в электромагнитное поле, создаваемое индуктором 4. Индуктор 4 подключен к генератору электрической мощности 5 через трансформатор 6. Индуктор 4 совместно с конденсатором 7, включенным последовательно в первичную обмотку трансформатора 6, образуют колебательный LC-контур. В зависимости от индуктивности катушки индуктора 4, ёмкости конденсатора 7, а также от характеристик соединяемых деталей, резонансная частота LC-контура изменяется. Это изменение через автогенератор 8 поддерживает контур в резонансе, изменяя частоту в зависимости от величины индуктивности индуктора 4. Соединяемые детали 1 и 2, имеющие осесимметричную форму, расположены соосно индуктору 4, опора 9 содержит подшипниковый узел 10, в котором установлена вращающаяся платформа 11, вращение платформы 11 обеспечивается приводом 12. На платформе 11 установлено посадочное место 13, которое соосно оси вращения платформы 11. При вращении соединяемых деталей в процессе нагрева погрешности установки соединяемых деталей относительно индуктора оказывают меньшее влияние на равномерность нагрева места соединения.

Обработка индукционной пайки гильз-держателей проводилась в трёх основных направлениях:

- получение паяных соединений в условиях вакуума;
- получение паяных соединений в среде инертного газа;
- получение паяных соединений с использованием защитных составов.

Для обеспечения вакуума индуктор и соединяемые детали помещались в герметичную камеру, из которой откачивался воздух при помощи форвакуумного насоса до достижения остаточного давления не более 1×10^{-3} мм рт. ст. Использование герметичной камеры также позволяет реализовать и второй способ путём нагнетания в неё инертного газа (например, аргона), вытесняя воздух, что позволяет создать инертную газовую среду в области пайки.

Как в вакууме, так и в инертной среде были получены качественные паяные соединения, соответствующие перечисленным выше требованиям. Следует отметить, что одним

из главных преимуществ пайки в условиях вакуума по сравнению с газовой атмосферой является стабильное получение паяного шва без пустот и полостей, что делает соединение вакуумплотным.

Однако использование герметичной камеры оказывается непрактичным для серийного производства, требующего минимального времени проведения операции и минимизации производственных затрат. Дело в том, что при использовании камеры ограничивается доступ к соединяемым деталям в процессе пайки и усложняется визуальный контроль за ходом процесса. Кроме того, создание вакуума или обеспечение газовой среды в камере занимает значительное время и выполняется каждый раз при установке нового комплекта деталей.

Одним из вариантов решения проблемы является осуществление индукционной пайки в среде инертного газа без создания герметичного объёма. В этом случае используется установка, в которой инертный газ подаётся в область формирования паяного шва под давлением. При таком методе, несмотря на удовлетворительное качество получаемого соединения и значительное сокращение времени проведения операции, главным недостатком является повышенный расход инертного газа, удорожающий процесс.

Для серийного производства держателей в АО «НПО «Орион» отработана индукционная пайка в воздушной среде, позволяющий обеспечивать качественное соединение и исключать появление окисной плёнки на поверхностях соединяемых деталей. Для этих целей при проведении пайки используются защитные составы, наносимые на поверхности деталей и препятствующие окислению этих поверхностей и одновременно улучшающие смачивание расплавленного припоя. В качестве таких составов могут использоваться паяльные флюсы определённых марок.

Процесс пайки с использованием защитных составов осуществляется следующим образом. Перед началом пайки для защиты от воздействия окружающей среды и улучшения распространения расплавленного припоя, на поверхности деталей и на припое наносит флюс. При этом, в отличие от обычной практики применения паяльных флюсов, флюсом покрываются все поверхности деталей полно-

стью, а не только участки в зоне пайки. Соединяемые детали могут быть изготовлены из нержавеющей стали, кобальта. При этом возможно соединять детали из разных материалов. Для пайки используется припой, температура плавления которого ниже температуры высокого отпуска сталей. В случае соединения пайкой деталей из перечисленных выше материалов используется серебрено содержащий припой, а в качестве флюса – высокотемпературный паяльный флюс на основе борной кислоты. Затем при помощи индуктора нагревают с заданной скоростью соединяемые детали, припой и флюс до температуры, при которой раствор флюса обладает наилучшим смачиванием – способностью поддерживать контакт с твёрдой поверхностью за счёт сил межмолекулярного взаимодействия (практика показывает, что при применении флюса значение температуры составляет 420 °С). Осуществляют выдержку деталей при данной температуре, а затем нагревают их до температуры плавления припоя (для рассматриваемого примера 595 – 605 °С). Затем нагрев отключают, после чего детали остывают до комнатной температуры, и остатки флюса удаляются в слабом растворе гидроксида натрия.

Вследствие индукционного нагрева в месте соединения пайкой деталей происходит окисление поверхности втулки и трубки держателя, что может негативно сказаться при вакуумировании держателя в составе криостата. Для удаления образующейся оксидной плёнки на поверхности втулки применяется промывка в горячем водном растворе динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты, принцип работы которой основан на извлечении катионов нерастворимых солей железа, входящих в состав оксидной плёнки, в степени окисления +2, +3 и замещением их катионами натрия, практически все соли которого растворимы в воде. Поскольку динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты не является окислителем, взаимодействие с металлом в нулевой степени окисления не происходит. Образующиеся на поверхности держателя комплексные растворимые соли железа легко удаляются промывкой в горячей воде.

Преимуществом данного метода является возможность проведения пайки на открытом

воздухе без использования камеры. Это также даёт возможность деталям быстрее остывать после нагрева и сокращает время проведения операции. Ускорить процесс остывания можно, применив принудительный обдув. За счёт удобства доступа к соединяемым деталям и индуктору можно обеспечить более точное выставление деталей относительно индуктора.

По результатам исследований и разработки методов индукционной пайки был получен патент [4] на способ индукционной пайки.

Проведённая работа позволила обеспечить устойчивое серийное изготовление гильз-держателей. Внешний вид держателей серийного выпуска представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид гильз-держателей серийного выпуска

Одним из важнейших требований к гильзам-держателям является обеспечение герметичности паяного шва. Проверка герметичности осуществляется с использованием специального приспособления, устройство которого показано на рис. 4. Приспособление воспроизводит условия работы держателя в составе МКС и вакуумного криостата при повышенном давлении гелия (20–50 кгс/см²) внутри гильзы-держателя. Таким образом, контролируется именно утечка гелия из держателя, что характерно для его работы в со-

ставе микрокриогенной системы, а не натекание в держатель, как при традиционном методе проверки с использованием течеискателя.

На рис. 4 показаны: проверяемая гильза-держателя 1, который герметично соединяется с корпусом 6 при помощи уплотнительного кольца 3 (в качестве материала-уплотнителя использована проволока припоя) и фланца 8. Через заправочный клапан 4 в корпусе 6, уплотняемым диском из припоя, производят заправку внутренней полости гильзы-

держателя газообразным гелием с заданным избыточным давлением. Далее гильзу-держателя стыкуют со втулкой 9 через уплотнительное фторкаучуковое кольцо 2. Втулка с двух сторон имеет фланцы, один из которых 11 (стандарта КФ) фиксируется хомутом 5 на корпусе 6, обеспечивая прижимное усилие со стороны втулки 9 на проверяемую гильзу-держателя 1; другой фланец 7 (стандарта КФ) аналогичным образом соединяется с гелиевым течеискателем.

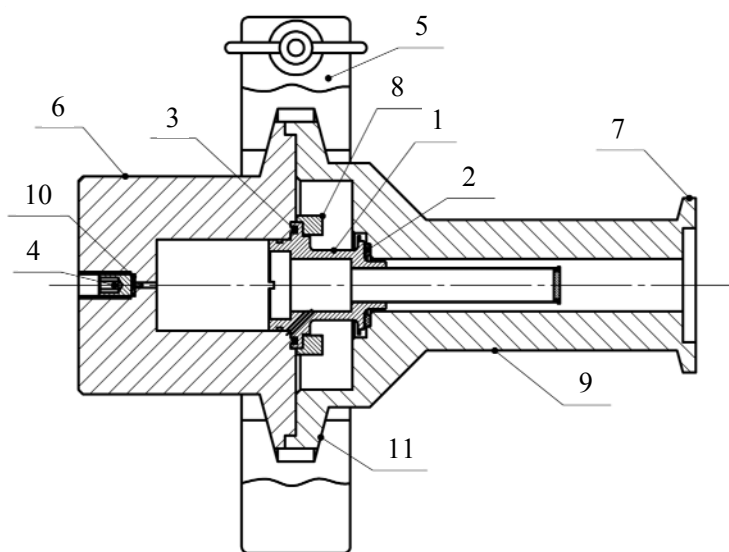


Рис. 4. Конструкция приспособления для проверки герметичности: 1 – проверяемая гильза-держателя; 2, 3 – уплотнительные кольца; 4 – клапан; 5 – хомут; 6 – корпус; 7 – присоединительный фланец КФ; 8 – фланец; 9 – втулка; 10 – заправочное отверстие; 11 – фланец КФ

Такая конструкция позволяет производить поиск течи с большей чувствительностью. Регистрируемая скорость утечки гелия составляет 5×10^{-13} Па·м³/с, что соответствует предельной чувствительности используемого гелиевого течеискателя.

Выводы

Результаты проведенных исследований позволили обеспечить устойчивый серийный выпуск держателей вакуумных криостатируемых корпусов с высокими эксплуатационными характеристиками. При проверке герме-

тичности подтверждено, что скорость утечки газа (гелия) из рабочей полости держателя составляет не более 5×10^{-13} Па·м³/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новотельнов В. Н. и др. Криогенные машины. – СПб.: Политехника, 1991.
2. Вологдин В. В. и др. Индукционная пайка. – Л.: Машиностроение, 1989.
3. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. – М.: Машиностроение, 1988.
4. Банников М. В., Кортаев Е. Д., Шаров А. А. Способ индукционной пайки. Патент RU 2824969 РФ С1 В23К 1/002, опубли. 19.08.2024. Бюл. № 23.

Investigation of vacuum-tight cooled assemblies for FPAs

E. D. Korotaev^{1,*}, D. I. Guryev¹, A. I. Guryev¹, A. A. Zinkovsky¹, D. I. Morozov¹
and A. A. Sharov^{1,2}

¹ RD&P Center Orion, JSC, Moscow, 111538 Russia

* E-mail: korotaevrus@gmail.com

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 105064 Russia

Received 27.10.2025; revised 10.11.2025; accepted 11.12.2025

An investigation of the properties of vacuum-tight brazed joints produced by induction brazing for use in components of vacuum cryogenic assemblies of cooled focal-plane arrays (FPAs), specifically in their cold fingers. The specific design features and operational conditions of these joints in micro-cryogenic FPA cooling systems were taken into account. To monitor the helium leak rate, dedicated tooling was developed, which significantly enhanced the ultimate sensitivity of the helium leak detector. The measured helium leak rate of the fabricated assembly samples is 5×10^{-13} Pa·m³/s.

Keywords: induction brazing; vacuum cryogenic housing; focal-plane array.

REFERENCES

1. Novotelnov V. N. et al., Cryogenic machines. St. Petersburg, Polytechnica, 1991.
2. Vologdin V. V. et al. Induction soldering. Leningrad, Mashinostroenie, 1989.
3. Lashko S. V. and Lashko N. F. Soldering of metals. Moscow, Mashinostroenie, 1988.
4. Bannikov M. V., Korotaev E. D. and Sharov A. A. Induction soldering method. Patent RU 2824969. 2024.

Об авторах

Коротаев Евгений Дмитриевич, инженер 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: korotaevrus@gmail.com SPIN-код: 7229-7672

Гурьев Дмитрий Игоревич, инженер-конструктор 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: ptokrs@mail.ru

Гурьев Андрей Игоревич, инженер-испытатель, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: wwwesche@gmail.com

Зиньковский Александр Александров, начальник Центра технологического сопровождения и разработки технологии (ЦТСИРТ), АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: Rabota2114@yandex.ru

Морозов Дмитрий Игоревич, инженер-технолог 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: morozovdi1995@mail.ru

Шаров Александр Александрович, к.т.н., зам. начальника Центра микрофотоэлектроники, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) (105064, Россия, Москва, Гороховский пер., 4).