

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ С СИТАЛЛОМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИБОРОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© А. П. Королев¹✉, Д. М. Мордасов¹

¹ Кафедра «Материалы и технология»,
korolevanpal@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: алюминиевый катод; вакуумное напыление; диффузионная сварка; медный анод; оксидный эмиссионный слой; ситалл.

Аннотация: Показаны преимущества диффузионного сварного соединения алюминиевого катода и медного анода с ситалловым корпусом лазерного гироскопа по сравнению с пайкой легкоплавким припоем индия. Приведены разработанная технология диффузионной сварки и экспериментальные результаты по определению качества и надежности соединения. Представлено исследование физико-химических процессов, происходящих при осуществлении диффузионной сварки.

Введение

Газоразрядные кольцевые лазеры для систем инерциальной навигации летательных аппаратов находят широкое применение в современных приборах. Существует ряд технологических проблем при изготовлении гироскопов [1 – 4], которые необходимо решать для повышения свойств функциональных компонентов газоразрядных кольцевых лазеров, от которых зависит долговечность и точность работы всего гироскопа.

Точность, временной ресурс и надежность лазерного гироскопа можно увеличить, расширив тем самым сферу его использования, например в космической технике. Эти характеристики зависят и от надежности и герметичности крепления катода и анода к ситалловому корпусу гироскопа [1].

Цель работы – исследовать применение диффузионной сварки меди и алюминия с ситаллом с промежуточным слоем из алюминия.

Методика проведения исследований

Наиболее распространенной технологией крепления катода и анода к ситалловому блоку является пайка с помощью легкоплавкого припоя индия с температурой плавления 145 °С. Это соединение обеспечивает необходимую герметичность и прочность. Однако серьезным недостатком индиевой пайки является то, что в экстремальных условиях эксплуатации (авиация, космос) возможен нагрев до температур, близких к температуре плавления индия. Возникновение такой ситуации неизбежно приведет к отказу в работе лазерного гироскопа. В связи с этим решено на основании проведенных исследований разработать технологию диффузионной сварки катодов и анодов к ситалловому блоку гелий-неонового лазерного гироскопа. При технологических операциях диффузионной сварки

в зоне сварного соединения происходят микро- и субмикроструктурные изменения [2, 4, 5], который влияют на качество изделия. Чтобы избежать этих нежелательных явлений сварку катода и анода к ситаллу осуществляли через промежуточный слой. Выбор оптимального промежуточного слоя, обеспечивающего получение высококачественного соединения разнородных материалов, диктуется следующими требованиями к его свойствам: хорошей свариваемостью при нагреве в вакуумной печи; благоприятными теплофизическими характеристиками для осуществления твердофазного соединения; соответствием по термическим коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) и модулю упругости между основными материалами. Наиболее распространенными промежуточными материалами для соединения неметаллов являются алюминий, медь, ковар 29НК, ниобий и титан, применяемые в виде фольги толщиной не более 0,2 мм. При большей ее толщине металл выступает в роли самостоятельного элемента конструкции. Для формирования сварного соединения неметалла (ситалла) с металлом (медным анодом) через промежуточный алюминиевый слой необходимо исследовать физико-химические процессы, происходящие на границе медь – алюминий [2]. Исследовав эти процессы, можно управлять формированием сварного соединения для получения требуемого качества.

При сварке меди с алюминием происходит взаимодиффузия меди в алюминий и алюминия в медь. В системе медь – алюминий могут образовываться различные фазы, неоднозначно влияющие на механические характеристики приграничных слоев медь – алюминий и алюминий – медь. Практический интерес представляют твердый раствор алюминия в решетке меди и твердый раствор меди в решетке алюминия. Твердый раствор на основе Cu имеет широкую область гомогенности (рис. 1): при температурах ниже 565 °С (в том числе ниже температуры сварки 300 °С) в меди может раствориться до ~ 8 масс. % алюминия.

Растворимость меди в алюминии значительно меньше (рис. 2): при эвтектической температуре (548 °С) составляет ~ 5,7 масс. %, с понижением температуры растворимость уменьшается до ~ 0,5 масс. % при температурах ниже 300 °С (температура диффузионной сварки).

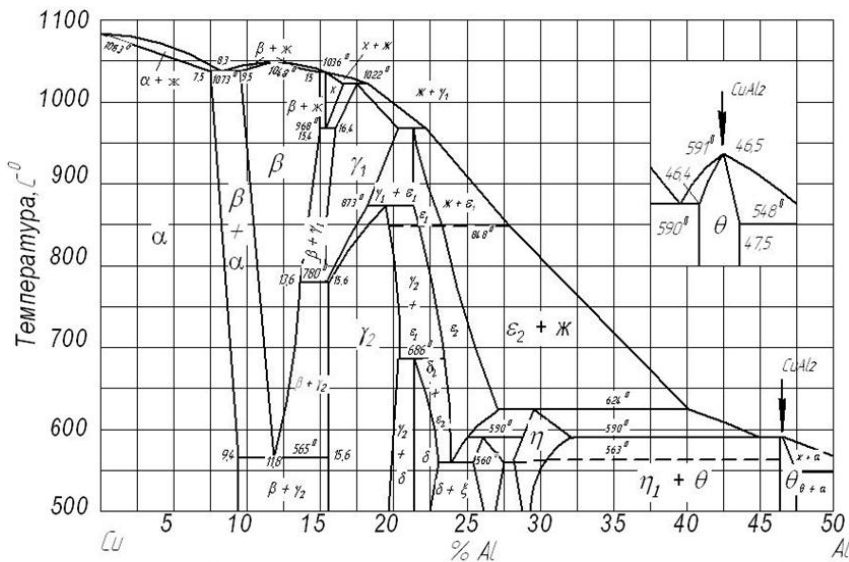


Рис. 1. Диаграмма системы медь – алюминий

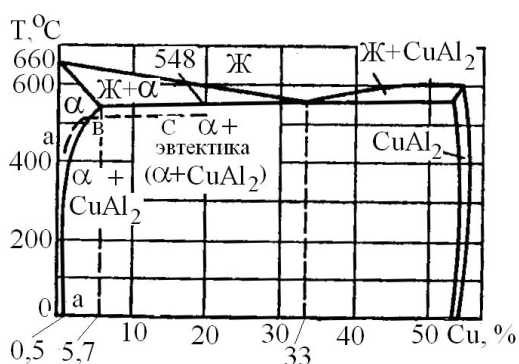


Рис. 2. Диаграмма системы алюминий – медь

Переменная растворимость меди в решетке алюминия приводит к появлению фазы CuAl_2 – твердых и хрупких выделений по границам зерен (Al) – твердого раствора. В связи с этим при диффузионной сварке алюминия и меди диффузионный слой должен состоять из пластичного твердого раствора алюминия в меди с гранецентрированной кубической решеткой и пластичного твердого раствора меди в алюминии с такой же решеткой. Необходимо, чтобы оба твердых раствора имели близкие параметры решеток и механические характеристики – твердость, прочность, пластичность и ТКЛР. Такие параметры позволят избежать механических напряжений и, как следствие, разрушений на границах слоев. Однако в твердом растворе меди в алюминии при охлаждении возможно выделение хрупкой фазы CuAl_2 , что ухудшает пластичность диффузионного слоя со стороны алюминия. Образование остальных промежуточных фаз при диффузионной сварке невозможно, так как при диффузии растворимость при низких температурах (до 300 °C) ограничена из-за малой подвижности атомов.

Экспериментально доказано, что для борьбы с выделением хрупкой фазы CuAl_2 охлаждение следует проводить с малой скоростью (до 95 °C/мин). Диффузионная сварка осуществлялась в вакууме [1], поэтому охлаждение проводили натеканием в вакуумную камеру аргона (продувкой в аргоне). Через двое суток в результате старения все равно выделяются фазы-упрочнители CuAl_2 , но без быстрого охлаждения перед старением они выделяются в мелкодисперсном виде, образуя зоны Гинье–Престона (микрообласти, насыщенные атомами растворенного компонента). Эти зоны, повышая прочность диффузионного слоя не охрупчивают его. При сварке катода с ситалловым корпусом, казалось бы, не требуется промежуточного алюминиевого слоя, так как катод выполнен из алюминия. Но проведенные исследования высокочистого алюминия А5N показали, что процессы самодиффузии и связанной с ней ползучести под нагрузкой 1200 Н начинаются в алюминии уже ниже 0,3 температуры плавления $T_{\text{пл}}$ (ниже 198 °C).

В первых экспериментах диффузионную сварку катодов проводили напрямую контактом металлической детали с ситаллом. Контактные поверхности ситалла и алюминия обезжиривали спиртом, металл дополнительно травили в 5%-м водном растворе HF для создания микрорельефа. Уже двухчасовая выдержка при температуре 350 °C под нагрузкой 1200 Н приводила к оптическому контакту соединяемых деталей. Контроль герметичности конструкции успешно выдерживала. Однако наличие большой макропластической деформации по фланцу алюминиевой детали приводило к заметному росту площади контакта, на которой формировались заметные термические напряжения, связанные с разни-

цей ТКЛР алюминия и ситалла. Они вызывали разрушение по поверхности контакта в условиях ударных и вибрационных испытаний изделия. Разрушению способствовала существенная неоднородность макродеформации фланца алюминиевого катода: сочетание области почти трехмерного сжатия под нагружающим пуансоном и зоны свободного течения расширяющегося металла. Для локализации пластической деформации в области сварочного контакта алюминиевый катод – ситалл использовалась при сварке прокладка из алюминия А5N толщиной 20...100 мкм. Фольга получена из отходов заготовительного производства прокаткой. Перед сваркой прокладку и алюминиевый катод протравили в 5%-м водном растворе HF. Контактную поверхность ситаллового блока травили в 20%-м водном растворе плавиковой кислоты. Благодаря выбранной схеме в процессе сварки происходила микропластическая деформация промежуточной фольги в неровности микрорельефа катода и ситаллового блока. Формирующаяся развитая поверхность контакта деталей сглаживала градиент ТКЛР, что увеличило сопротивление образованию трещин в условиях динамического удара и виброиспытаний. Для осуществления диффузионной сварки изготовлено рычажное приспособление для обеспечения разного усилия при нагружении и выбора наиболее оптимального.

У катода лазера эмиссионным слоем является поверхностный оксид. Поэтому перед сваркой катоды подвергались окислению для получения оксидного эмиссионного слоя [3, 6, 7]. Затем фланцевый торец обрабатывался с целью удаления этого слоя, так как данная поверхность не участвует в эмиссии и оксид мешает диффузионному соединению с ситаллом. Подготовленные катоды с алюминиевыми прокладками помещались в нагружающее устройство и нагревались в вакуумной печи при температурах 100, 200, 300 и 350 °C в течение 30 мин, 1 ч, 3 ч и 5 ч. Затем полученные диффузионной сваркой соединения проходили регламентные испытания на соответствие следующим нормам: 1) допустимый нагрев при сварке должен быть не выше 300...350 °C; 2) величина остаточных напряжений не должна превышать 6 кг/см²; 3) соединение должно быть герметично при контроле методом гелиевого течеискателя; устойчивым к воздействию рабочих температур –60...+85 °C и термоциклированию в этом же диапазоне температур; 4) сварка должна выдерживать синусоидальные вибрации при амплитуде ускорения 40 м/с²; амплитудные перемещения 2,5 мм; диапазон частоты 5...2000 Гц; акустический шум в диапазоне частот 100...10000 Гц и уровень звукового давления 130 Дб; 5) конструкция должна выдерживать механические удары многократного действия – 10 000 ударов с пиковым ускорением 78 м/с² и длительностью действия 20 мс; одиночные удары с ускорением не менее 400 м/с².

Для получения более однородного, следовательно, более надежного и герметичного переходного слоя между алюминиевым катодом и ситалловым блоком, было решено в качестве прокладки использовать напыленный в вакууме на ситалл слой алюминия. Новая технология диффузионной сварки с промежуточным слоем включает в себя следующие основные операции:

- визуальный контроль поверхностей фланца катода и ситаллового блока с помощью оптического микроскопа отражательного типа и промывка деионизованной водой;
- травление поверхности фланца в 5%-м растворе HF для создания микрорельефа (развитой поверхности);
- травление поверхности ситаллового блока в 20%-м растворе HF для создания микрорельефа (развитой поверхности);
- напыление тонкого слоя хрома на поверхность ситаллового блока для улучшения адгезии;

- напыление на хром пленки алюминия;
- помещение блока с катодом в нагружающее устройство под нагрузкой 550 Н на всю площадь поверхности фланца;
- выдержка блока с катодом в нагружающем устройстве в вакуумной печи при температуре 300 °С в течение 60 мин;
- контроль качества шва на герметичность и на прочность при растяжении.

Технология получения неразъемного соединения алюминиевого катода к ситалловому блоку методом диффузионной сварки позволяет создавать герметичное соединение [5] алюминиевого катода и ситаллового блока, выдерживающее большие температуры и механические нагрузки по сравнению с соединениями, полученными традиционной технологией пайки легкоплавким припоем индия. Сварное соединение с напыленным промежуточным слоем успешно прошло те же испытания, что и соединение с фольгой. Испытания сварного соединения на прочность показали, что при отрыве катода от ситаллового блока сварной слой не разрушился, а оторвался вместе с катодом – разрушился сам ситалл (рис. 3). Таким образом, оказалось, что сварное соединение прочнее самого ситалла.

Проведенные регламентные испытания сварных соединений показали, что наиболее оптимальные свойства диффузионной сварки получаются при толщине промежуточного слоя алюминия 50 мкм, давлении 3 кг/мм², температуре 300 °С и времени выдержки 3 ч. По такой же технологии крепился анод к ситалловому блоку. Получены экспериментальные образцы крепления диффузионной сваркой анода и катода к ситаллу (рис. 4).

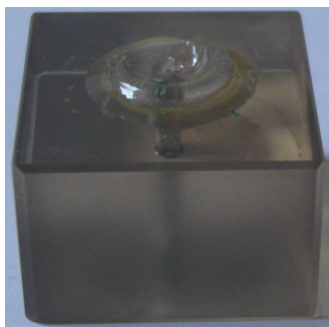


Рис. 3. Место отрыва катода от ситаллового блока

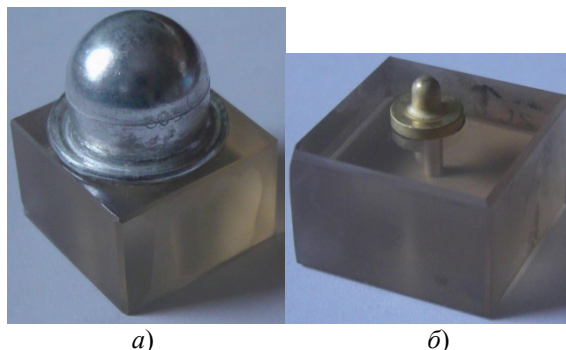


Рис. 4. Крепление к ситаллу СО-115М (астроситаллу) диффузионной сваркой алюминиевого катода 285-3 (а) и медного анода (б)

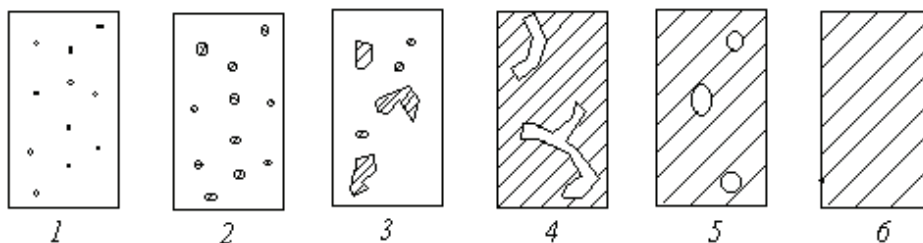


Рис. 5. Формирование сплошной пленки при вакуумном напылении:

- 1, 2 – зарождение и рост зародышей;
- 3 – коалесценция зародышей;
- 4 – образование лабиринтной структуры;
- 5 – возникновение отдельных несплошностей;
- 6 – образование сплошной пленки

Результаты исследований

Для осуществления сварки через промежуточный алюминиевый слой проведено исследование модели формирования пленочной структуры. Физическая модель формирования структур с тонкой пленкой зависит от процесса перехода алюминия из газообразной фазы в твердую или жидкую (рис. 5).

Значительное влияние на рост и форму островков оказывает температура на поверхности напыления $T_{п.н.}$, в зависимости от которой конденсация может осуществляться по двум механизмам: пар – кристалл (**ПК**) и пар – жидкость – кристалл (**ПЖК**) (через жидкую фазу). Переход от одного механизма к другому осуществляется при критической температуре $T_{кр1} \approx 2/3 T_{пл}$, если конденсация происходит на нейтральную неориентирующую поверхность ситалла.

Форма островков в значительной степени определяется механизмом конденсации. В области $T_{п.н.} \geq T_{кр1}$, то есть при конденсации по механизму ПЖК, островки имеют сферическую форму или ограниченную форму с линейными размерами одного порядка в трех измерениях.

При более низких температурах конфигурация островков и промежутков зависит от возможности формоизменения островков. Значению $1/3 T_{пл}$ соответствует вторая критическая температура $T_{кр2}$, которая отвечает порогу рекристаллизации. В интервале температур $T_{кр2} < T_{п.н.} < T_{кр1}$, конденсация осуществляется по механизму ПК. При этом островки растут в виде плоских образований и, если степень заполнения невелика, могут иметь кристаллическую огранку. В этой области конденсат обычно текстурован.

В области ниже $T_{кр2}$ пар переходит в жидкость. Определенную роль в образовании структуры в данном случае играет вращательная и поступательная миграция островков. Ниже $T_{кр2}$ плотность островков существенно увеличивается. Для ранних стадий роста пленки характерно образование лабиринтной структуры. В дальнейшем зародыш и капельки жидкой фазы неустойчивы и переходят в кристаллическое образование.

Заключение

В результате проделанной работы проведены теоретические и экспериментальные исследования физико-химических процессов, лежащих в основе нового диффузионного метода формирования неразъемного соединения катода и анода с ситалловым корпусом лазерного гироскопа. Для применения соединения алюминиевых катодов и медных анодов с ситалловым блоком в гироскопах космических систем осуществлены исследования диффузионных процессов с применением тонкопленочных технологий для создания промежуточного слоя (алюминия) при диффузионной сварке.

Проведенные исследования дают возможность использовать диффузионные соединения в более тяжелых условиях (в аэрокосмической технике) по сравнению с соединениями традиционной пайкой легкоплавкими металлами (с помощью легкоплавкого припоя индия). Разработанная новая технология диффузионной сварки металла с неметаллом, а именно алюминия и меди с ситаллом с промежуточным алюминиевым слоем, полученным в вакууме по тонкопленочным технологиям, позволяет получать соединения, обеспечивая их высокую надежность и прочность, герметичность, выдерживать более высокие температуры. Положительные результаты испытаний подтверждают целесообразность создания неразъемного соединения диффузионной сваркой.

Список литературы

1. Диффузионная сварка металлов к ситаллу / А. М. Минаев, Л. Н. Тялина, В. А. Пручкин, Д. М. Мордасов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 3(41). – С. 342–344.
2. Влияние технологических операций на структуру высокочистого алюминия при изготовлении холодных катодов / А. М. Минаев, Л. Н. Тялина, А. П. Королёв, Д. М. Мордасов, И. С. Филатов, В. А. Пручкин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 43С. – С. 28–32.
3. Брусенцов, Ю. А. Влияние времени окисления на толщину оксидного слоя алюминия / Ю. А. Брусенцов, И. С. Филатов, И. Г. Проценко // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 4(42). – С. 321–325.
4. Металлографические исследования алюминия А5N после технологических операций / А. П. Королёв, А. М. Минаев, Д. М. Мордасов, Л. Н. Тялина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – Т. 1, № 1(21). – С. 64–67.
5. Медведева, А. В. Классификация методов контроля пористости материалов / А. В. Медведева, Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 749–754.
6. Королёв, А. П. Определение толщины пленки Al_2O_3 на холодных катодах оптическим методом / А. П. Королёв, Д. М. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета, – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 683–687.
7. Королёв, А. П. Эллисометрический метод определения толщины пленки Al_2O_3 на алюминии / А. П. Королёв, Д. М. Мордасов // Математические методы в технике и технологиях : сборник трудов. – Саратов, 2012. – Т. 6. – С. 11–12.

Research and Application of Diffusion Welding of Copper and Aluminum with Sytall in the Production of Aircraft Instruments

© A. P. Korolev¹✉, D. M. Mordasov¹

¹ Department of Materials and Technology, korolevanpal@yandex.ru;
TSTU, Tambov, Russian Federation

Keywords: aluminum cathode; vacuum deposition; diffusion welding; copper anode; oxide emission layer; sitall.

Abstract: The advantages of a diffusion welded joint of an aluminum cathode and a copper anode with a sitall housing of a laser gyroscope compared to soldering with low-melting indium solder are shown. A developed diffusion welding technology and experimental results for determining the quality and reliability of the joint are presented. The study of the physicochemical processes occurring during diffusion welding is presented.

References

1. Minayev A.M., Tyalina L.N., Pruchkin V.A., Mordasov D.M. [Diffusion welding of metals to sitall], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 3(41), pp. 342–344. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Minayev A.M., Tyalina L.N., Korolev A.P., Mordasov D.M., Filatov I.S., Pruchkin V.A. [The influence of technological operations on the structure of high-purity aluminum in the manufacture of cold cathodes], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki*.

Universitet im. V.I. Vernadskogo [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 43S, pp. 28-32. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Brusentsov Yu.A., Filatov I.S., Protsenko I.G. [Effect of oxidation time on the thickness of the aluminum oxide layer], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 4(42), pp. 321-325. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Korolev A.P., Minayev A.M., Mordasov D.M., Tyalina L.N. [Metallographic studies of A5N aluminum after technological operations], *Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University], 2015, vol. 1, no. 1(21), pp. 64-67. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Medvedeva A.V., Mordasov D.M., Mordasov M.M. [Classification of methods for monitoring the porosity of materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 749-754. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Korolev A.P., Mordasov D.M. [Determination of Al_2O_3 film thickness on cold cathodes by an optical method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 683-687. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Korolev A.P., Mordasov D.M. [Ellipsometric method for determining the Al_2O_3 film thickness on aluminum], *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sbornik trudov* [Mathematical methods in engineering and technology: collected papers], Saratov, 2012, vol. 6, pp. 11-12. (In Russ., abstract in Eng.)

Forschung und Anwendung des Diffusionsschweißens von Kupfer und Aluminium mit Polymerkeramik bei der Herstellung der Flugzeugapparate

Zusammenfassung: Es sind die Vorteile der Diffusionsschweißverbindung der Aluminiumkathode und der Kupferanode mit dem Siebkörper des Laser-Gyroskops im Vergleich zum Lötens mit leichtschmelzendem Indium-Lot gezeigt. Die entwickelte Diffusionsschweißtechnologie sowie experimentelle Ergebnisse zur Bestimmung der Qualität und Zuverlässigkeit der Verbindung sind vorgestellt. Es ist die Untersuchung der während des Diffusionsschweißens ablaufenden physikalisch-chemischen Prozesse präsentiert.

Recherche et application du soudage par diffusion de cuivre et d'aluminium avec du sitall dans la fabrication d'instruments d'aéronefs

Résumé: Sont présentés les avantages de la soudure par diffusion de la cathode en aluminium et de l'anode en cuivre avec le corps en sitall du gyroscope laser par rapport à la soudure à l'indium. Est citée la technologie de soudage par diffusion développée et les résultats expérimentaux pour déterminer la qualité et la fiabilité de la connexion. Est présentée une étude des processus physico-chimiques qui se produisent lors de la mise en œuvre du soudage par diffusion.

Авторы: *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.