



УДК 621.791

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕМОНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ИСПРАВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ТОПЛИВНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

**В.С. Рыльников**  
*кандидат технических наук*

**А.Н. Афанасьев-Ходыкин**

**М.И. Красиков**

**Декабрь 2013**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,  
№12, 2013 г.

*В.С. Рыльников, А.Н. Афанасьев-Ходыкин, М.И. Красиков*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕМОНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИСПРАВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОПЛИВНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

*Приведено исследование дефектов паяных соединений топливных коллекторов из сплавов ЭП410 и 12Х18Н10Т, выполненных припоем ВПр4. Исследовано взаимодействие припоев ВПр4 и ВПр1 в процессе подпайки газовой горелкой топливных коллекторов припоем ВПр1, а также влияние температуры подпайки на микроструктуру паяных соединений топливных коллекторов после ремонта. Определена эффективность подпайки припоем ВПр1 топливных коллекторов в части устранения дефектов паяных соединений.*

**Ключевые слова:** *пайка, припой, нержавеющая сталь, дефект, ремонт, коллектор, форсунка.*

*V.S. Rylnikov, A.N. Afanasiev-Khodykin, M.I. Krasikov*

## **RESEARCH OF REPAIR TECHNOLOGY BUG FIXES BRAZED JOINTS FUEL RESERVOIR**

*The article presents the study of brazed joint defects of the fuel reservoir alloys EP410 and 12H18N10T made VPr4 solder. The interaction between solders and VPr4 VPr1 during double braze gas burner fuel reservoir solder VPr1. Double braze the effect of temperature on the microstructure of solder joints after repair of the fuel reservoir. The efficiency double braze solder VPr1 fuel reservoirs in the elimination of solder joint defects.*

**Keywords:** *brazing, solder, stainless steel, defect, repair, manifold, nozzle.*

Топливные коллекторы состоят из 96 паяемых элементов секций с форсунками, выполняемые печной пайкой припоем ВПр4 [1–4]. Соединения форсунок топливного коллектора из стали ЭП410 с секциями коллектора в виде трубок диаметром 6 и 12 мм с толщиной стенки 1 мм из стали 12Х18Н10Т и сплава ВЖ98 выполняются пайкой припоем ВПр4 [5–15]. Пайка производится при печном нагреве в контейнере. Температура

пайки составляет  $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка при этой температуре  $18 \pm 3$  мин. В процессе одновременной пайки столь большого числа паяемых элементов иногда возникают дефекты паяных соединений.

Печная повторная пайка припоем ВПр4 производится, если количество дефектных мест пять и более. Повторная пайка припоем ВПр4 при печном нагреве проводится по тому же режиму, что и первая пайка. Такая ремонтная пайка не всегда гарантирует исправление дефектов паяных соединений, а иногда и способствует появлению новых дефектов.

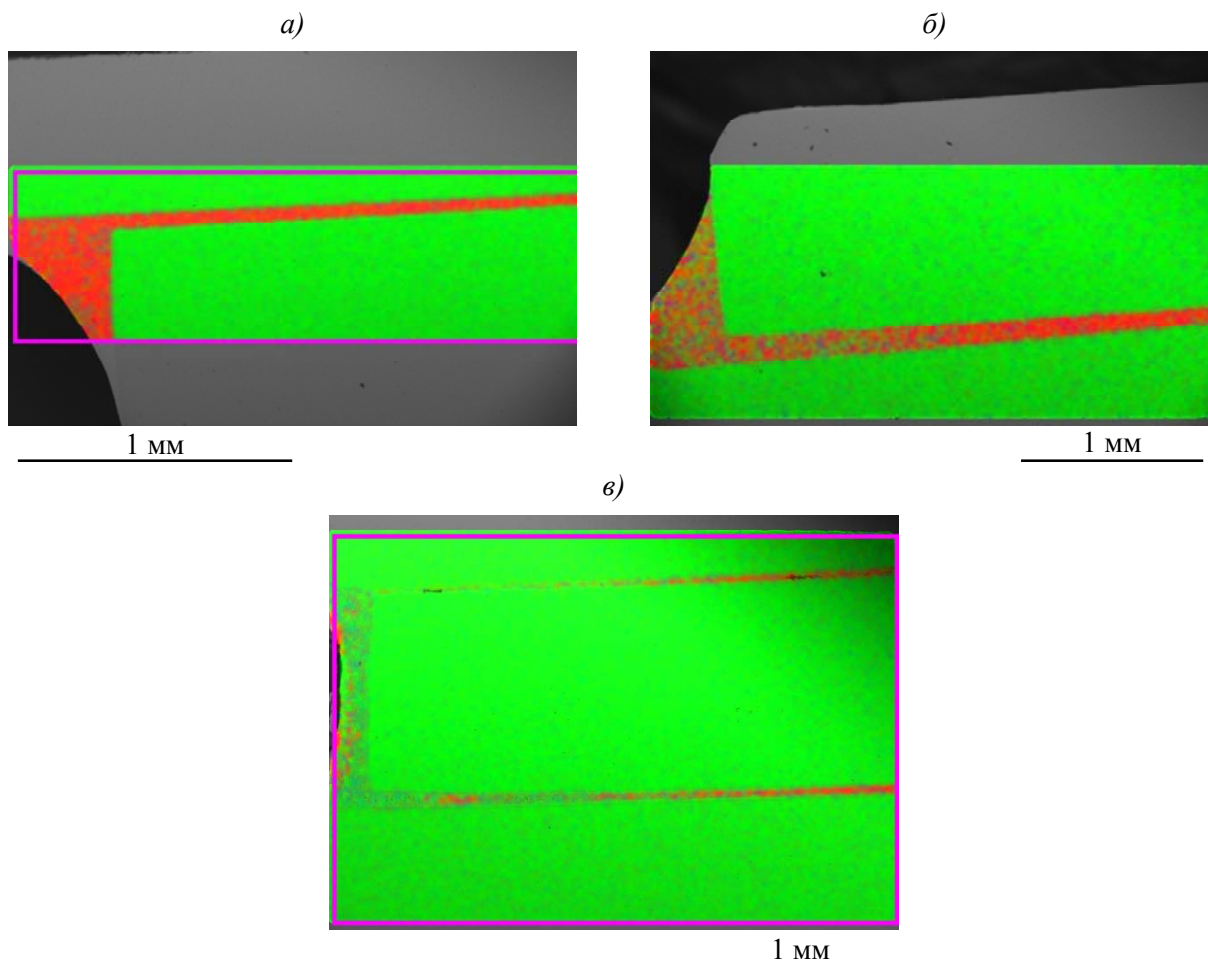
Поэтому опробована подпайка газовой горелкой припоем ВПр1. Подпайка припоем ВПр1 устраняет дефекты пайки, но ввиду того, что температура пайки припоем ВПр1 почти на  $130\text{--}150^\circ\text{C}$  выше, чем у припоя ВПр4, возникает ряд вопросов, решению которых в основном и посвящена данная работа. Прежде всего, необходимо выяснить, каким образом газопламенная подпайка припоем ВПр1 устраняет дефекты паяных соединений топливного коллектора, выполненных пайкой в печи припоем ВПр4.

Для сравнительной оценки структур паяных соединений форсунок топливного коллектора выполнена пайка модельных образцов по следующим технологиям:

- пайка в печи припоем ВПр4;
- пайка в печи припоем ВПр4 + подпайка газовой горелкой припоем ВПр1;
- пайка в печи припоем ВПр4 + подпайка газовой горелкой припоем ВПр1 с перегревом и увеличенной выдержкой при пайке.

Для изготовления шлифов соединений трубок с форсунками выбраны образцы, запаянные в печи припоем ВПр4, после ремонтной пайки припоем ВПр1 с нагревом газовой горелкой, в том числе и с перегревом. Шлифы изготавливались вдоль по образующим трубок таким образом, чтобы в плоскость шлифа попали одновременно две трубки, а плоскость шлифа проходила через оси трубок.

Анализ структур соединений, выполненных печной пайкой припоем ВПр4, показывает, что в галтелях паяных соединений присутствует усадочная пористость, в середине зазора присутствуют отдельные поры. После печной подпайки с укладкой дополнительного количества припоя также встречаются аналогичные дефекты. Это указывает на низкую эффективность печной подпайки, когда дополнительно уложенный припой не приводит к гарантированному устранению пористости в зазоре и расходуется на пополнение галтелей и облуживание поверхностей соединяемых деталей. Изображение структуры зазора в характеристическом излучении марганца показывает, что марганец распределен равномерно в галтели и по зазору (см. рисунок, а).



Паяный шов в характеристическом излучении марганца соединения, выполненного припоем ВПр4 (а), после подпайки припоем ВПр1 (б) и после подпайки ВПр1 с перегревом и увеличенной выдержкой при пайке (в)

Определение содержания элементов в паяном шве производилось микрорентгено-спектральным анализом. Кристаллизация припоя ВПр4 начинается с образования прослоек твердого раствора на основе меди на соединяемых поверхностях основного материала, которые увеличиваются по мере охлаждения после пайки. В середину зазора оттесняется жидкость с меньшей температурой плавления. В припое ВПр4 – это эвтектика, состоящая из твердого раствора на основе меди и силицидов и боридов марганца и никеля. В припое ВПр1 содержатся те же элементы, что и в припое ВПр4 (см. таблицу), но в припое ВПр4, в отличие от припоя ВПр1, содержатся дополнительно в существенных количествах марганец и кобальт. Поэтому анализ взаимодействия припоев при подпайке оценивался именно по содержанию этих элементов.

### Состав и температуры плавления и пайки припоев ВПр1 и ВПр4

Припой	Система элементов	Температура, °С	
		плавления	пайки
ВПр1	Cu–Ni–Si	1080–1120	1180–1210
ВПр4	Cu–Ni–Mn–Co–Si	940–980	1050–1080

Микроструктура в отраженных электронах различных участков соединений, выполненных припоем ВПр4 с подпайкой припоем ВПр1 по используемой на заводе технологии, включает изображение в характеристическом излучении марганца. В структуре паяного соединения, выполненного с подпайкой припоем ВПр1, видно, что пористость в зазоре наблюдается вблизи выходной галтели. У входной галтели в месте подпайки пористость отсутствует. Содержание марганца в галтели приблизительно в 2 раза меньше, чем в галтели соединения, выполненного припоем ВПр4, но уже в зазоре содержание марганца возвращается к значениям, характерным для соединений, выполненных припоем ВПр4. Изображение зазора в характеристическом излучении марганца показывает, что припой ВПр1 проник в зазор не более чем на 1,5 мм (см. рисунок, б).

Для того, чтобы более наглядно представить механизм формирования соединений при подпайке припоем ВПр1, был опробован режим пайки газовой горелкой с перегревом в процессе пайки. В структуре такого соединения видно, что происходит образование пористости в середине шва и вытекание эвтектической составляющей из выходной галтели, приводящее к деградации галтели. По составу припоя во входной галтели гораздо ближе к составу припоя ВПр1, чем к ВПр4. Распределение марганца, показанное в характеристическом излучении на рисунке, в, в соединении в месте, где входная галтель находится между двумя трубками, показывает, что галтель и значительные участки в зазоре заполнены припоем по составу, близким к припою ВПр1.

Очевидно, что при подпайке припоем ВПр1 соединений, ранее запаянных припоем ВПр4, устранение пористости в соединениях происходит из-за движения эвтектической составляющей припоя ВПр4 к расплаву припоя ВПр1, находящегося во входной галтели. Такое движение выталкивает пузырьки газа из зазора во входную галтель. При перегреве в процессе подпайки припоем ВПр1 происходит расплавление припоя ВПр4 и продвижение припоя ВПр1 в зазор. Устранение пористости в местах, близких к входной галтели, при подпайке припоем ВПр1 может приводить к деградации выходных галтелей и образованию пористости вблизи выходных галтелей.

Печная подпайка припоем ВПр4 неэффективна для устранения дефектов в ранее запаянных этим припоем соединениях. Подпайка припоем ВПр4 газопламенным нагревом не рекомендуется из-за интенсивного разбрызгивания припоя при таком нагреве.

Таким образом, исследована технология подпайки припоем ВПр1 соединений, первоначально запаянных припоем ВПр4. Определено, что при подпайке припоем ВПр1 эффективно устраняются дефекты в контролируемых участках соединения вблизи входной галтели. Устранение дефектов паяных соединений топливных коллекторов, выполненных припоем ВПр4 пайкой в печи, при подпайке припоем ВПр1 происходит за счет встречного движения эвтектической составляющей припоя ВПр4, выводящего пузырьки газов из зазора. Состав галтелей после подпайки припоем ВПр1 является промежуточным между составами припоев ВПр1 и ВПр4 и определяется соотношением количеств припоев, смешивающихся при подпайке, и переходом эвтектической составляющей припоя ВПр4 из зазора в расплавленную галтель.

Разработаны рекомендации по газопламенной подпайке припоем ВПр1 дефектов паяных соединений топливных коллекторов с форсунками из стали ЭП410 и секциями из сплавов 12Х18Н10Т и ВЖ98, выполненных печной пайкой припоем ВПр4.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–35.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
4. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
5. Рыльников В.С., Лукин В.И. Припои, применяемые для пайки материалов авиационного назначения //Труды ВИАМ. 2013. №8 (электронный журнал)
6. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Лукин В.И., Рыльников В.С. Высокотехнологичные полуфабрикаты жаропрочных припоев (ленты и пасты на органическом связующем) //Труды ВИАМ. 2013. №9 (электронный журнал).
7. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях //Сварочное производство. 1997. №4. С. 4–11.

8. Лукин В.И., Сорокин Л.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость литейных жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 //Сварочное производство. 1997. №6. С. 12–17.
9. Лукин В.И., Семенов В.Н., Старова Л.Л. и др. Образование горячих трещин при сварке жаропрочных сплавов //МиТОМ. 2007. №12. С. 7–14.
10. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия. 1976. 264 с.
11. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Вопросы теории и технологии пайки. М.: Изд-во Саратовского ун-та. 1974. 248 с.
12. Лашко Н.Ф., Лашко С.В., Пайка металлов. М.: Машиностроение. 1967. 368 с.
13. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС36 //Технология машиностроения. 2010. №5. С. 21–25.
14. Хорунов В.Ф., Максимова С.В. Пайка жаропрочных сплавов на современном этапе //Сварочное производство. 2010. №10. С. 24–27.
15. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Орехов Н.Г. Особенности пайки монокристаллических отливок из сплава ЖС32 //Сварочное производство. 2012. №5. С. 24–30.

#### Reference list

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Ospennikova O.G. Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley spetsial'nogo naznacheniya, zaschitnykh i teplozaschitnykh pokrytiy [Development strategics of high-temperature alloys and special steels, protective and thermoprotective coatings] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 19–35.
3. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Zharostoykie i teplozaschitnye pokrytiya dlya lopatok turbiny vysokogo davleniya perspektivnykh GTD [Heat-resistant and heat-protective coatings for the high pressure turbine blades of advanced GTEs] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 60–70.
4. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie protsessa napravlennoy kristallizatsii lopatok GTD iz zharoprochnykh splavov s monokristallicheskoj i kompozitsionnoj strukturoj [Advancement of the directional solidification process of GTE blades made of superalloys with single-crystal and compositional structures] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.

5. Ryl'nikov V.S., Lukin V.I. Pripoi, primenyaemye dlya payki materialov aviatsionnogo naznacheniya [Solders used for soldering materials of aeronautical application] //Trudy VIAM. 2013. №8 (elektronnyj zhurnal).
6. Afanas'ev-Hodykin A.N., Lukin V.I., Ryl'nikov V.S. Vysokotekhnologichnye polufabrikaty zharoprochnykh pripoev (lenty i pasty na organicheskom svyazuyuschem) [High-technology semi-finished products of heat-resistant solderes (tapes and pastes on an organic binder)] //Trudy VIAM. 2013. №9 (elektronnyj zhurnal).
7. Sorokin L.I. Svarivaemost' zharoprochnykh splavov, primenyaemykh v aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelyah [Weldability of heat-resistant alloys used in aircraft gas turbine engines] //Svarochnoe proizvodstvo. 1997. №4. S. 4–11.
8. Lukin V.I., Sorokin L.I., Bagdasarov Yu.S. Svarivaemost' liteynykh zharoprochnykh nikelovykh splavov tipa ZhS6 [Weldability of ZhS6-type heat-resistant casting nickel-based alloys] //Svarochnoe proizvodstvo. 1997. №6. S. 12–17.
9. Lukin V.I., Semenov V.N., Starova L.L. i dr. Obrazovanie goryachih treschin pri svarke zharoprochnykh splavov [Hot cracking during welding of heat-resistant alloys] //MiTOM. 2007. №12. S. 7–14.
10. Karakozov E.S. Soedinenie metallov v tverdoy faze [Joining of solid-phase metals]. M.: Metallurgiya. 1976. 264 s.
11. Lashko N.F., Lashko S.V. Voprosy teorii i tekhnologii payki [Aspects of soldering theory and technology]. M.: Izd-vo Saratovskogo un-ta. 1974. 248 s.
12. Lashko N.F., Lashko S.V., Payka metallov [Soldering of Metals]. M.: Mashinostroenie. 1967. 368 s.
13. Lukin V.I., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N. Osobennosti polucheniya payanykh soedineniy iz splava ZhS36 [Features of Making of ZhS36 alloy soldered joints] //Tekhnologiya mashinostroeniya. 2010. №5. S. 21–25.
14. Horunov V.F., Maksimova S.V. Payka zharoprochnykh splavov na sovremennom etape [Present-day soldering of heat-resistant alloys] //Svarochnoe proizvodstvo. 2010. №10. S. 24–27.
15. Lukin V.I., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N., Orehov N.G. Osobennosti payki monokristallicheskiy otlivok iz splava ZhS32 [Features of soldering of single crystal castings made of ZhS32 alloy] //Svarochnoe proizvodstvo. 2012. №5. S. 24–30.