

УДК 620.193

*А.В. Свиридов¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹, И.А. Галушка¹***КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ТОПЛИВНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ГТД,
ВЫПОЛНЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ПРИПОЯМИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-23-33

Приведены результаты работы по оценке коррозионной стойкости паяных соединений коррозионностойких сталей, применяемых при изготовлении топливных коллекторов газотурбинных двигателей, в условиях камеры солевого тумана. Выявлены основные виды коррозионных повреждений паяных соединений, выполненных припоями различных типов (на основе меди и никеля). Определено влияние типа припоя и марки паяемых материалов на характер коррозионных повреждений паяных соединений. По результатам исследований сделаны предположения о механизме возникновения и развития коррозионных повреждений паяных соединений различных материалов.

Ключевые слова: топливный коллектор, газотурбинный двигатель, коррозионно-стойкая сталь, паяное соединение, припой, коррозионная стойкость.

*A.V. Sviridov¹, A.N. Afanasyev-Khodykin¹, I.A. Galushka¹***CORROSION RESISTANCE OF THE BRAZED JOINTS
OF THE GTE FUEL MANIFOLDS,
MADE WITH VARIOUS BRAZING ALLOYS**

Presents the results of work on assessing the corrosion resistance of brazed joints of corrosion-resistant steels used in the manufacture of fuel manifolds for gas turbine engines in a salt spray chamber. The main types of corrosion damage of brazed joints made with brazing alloys of various types (based on copper and nickel) have been identified. The influence of the type of brazing alloy and the grade of the brazed materials on the nature of corrosion damage to brazed joints is determined. Based on the research results, assumptions have been made about the mechanism of occurrence and development of corrosion damage in brazed joints of various materials.

Keywords: fuel manifold, gas turbine engine, corrosion-resistant steel, brazed joint, brazing alloy, corrosion resistance.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

При изготовлении топливных коллекторов ГТД широкое применение находят различные коррозионностойкие стали. Широкое применение таких сталей обусловлено их высокой технологичностью, широкой номенклатурой выпускаемых полуфабрикатов и относительно низкой стоимостью по сравнению с никелевыми жаропрочными сплавами. В процессе эксплуатации и хранения топливные коллекторы подвергаются сильному коррозионному воздействию из-за сложных условий работы – значительных колебаний рабочей температуры, взаимодействия с продуктами сгорания топлива, эрозивного воздействия воздушного потока с частицами пыли и значительных перепадов влажности воздуха. При этом зачастую топливные коллекторы представляют собой

сложные объемные конструкции, которые невозможно получить без применения большого количества паяных соединений.

В последние годы возрос объем эксплуатации отечественных ГТД в зонах тропического и морского климата. Данные климатические зоны характеризуются высокой коррозионной агрессивностью: повышенные температуры воздуха, влажность и содержание различных солей в атмосферном воздухе [1–4]. Топливные коллекторы в процессе работы подвержены значительным усталостным знакопеременным нагрузкам, которые в сочетании с коррозионными повреждениями могут вызывать разрушение топливного коллектора и выход из строя двигателя в целом.

Для оценки коррозионной стойкости топливных коллекторов, изготовленных из различных коррозионностойких сталей, проведено исследование коррозионного поведения паяных соединений коррозионностойких сталей, выполненных различными припоями, в условиях камеры солевого тумана. Данные исследования позволят установить закономерности взаимного влияния припоев и паяемых материалов на коррозионную стойкость паяных соединений в целом и оценить возможное коррозионное поведение топливных коллекторов в условиях воздействия атмосферы с повышенной коррозионной активностью.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.9. «Припой и технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами для формирования оптимальной структуры паяного соединения» и комплексного научного направления 18. «Климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5–7].

Материалы и методы

В качестве коррозионностойких сталей при изготовлении топливных коллекторов наиболее широко используются:

- сталь 12Х18Н10Т – преимущественно для изготовления трубопроводов и соединительных муфт;
- стали ЭИ961 и ЭП410 – для изготовления топливных форсунок.

Содержание основных легирующих элементов сталей приведено в таблице.

Содержание основных легирующих элементов сталей, используемых для изготовления топливных коллекторов

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)							
	Fe	Cr	Ni	C	Ti	Mo	W	V
ЭИ961	Основа	10,5–12,0	1,5–1,8	0,1–0,16	–	0,35–0,5	1,6–2,0	0,18–0,3
ЭП410	Основа	14,0–16,0	4,0–6,0	<0,08	–	–	–	–
12Х18Н10Т	Основа	17,0–19,0	9,0–11,0	<0,12	0,4–1,0	–	–	–

Хром и никель являются элементами, повышающими коррозионную стойкость сталей. Видно, что все стали имеют различное содержание данных элементов и расположены в таблице по мере повышения коррозионной стойкости.

В качестве припоя для пайки топливных коллекторов ГТД наиболее широкое применение получил припой ВПр4 системы Ni–Cu–Mn [8–12]. Одним из наиболее перспективных припоев для пайки топливных коллекторов является также припой ВПр50 на основе никеля системы Ni–Co–Cr–Mo–Si–B [13–17]. Основным его преимуществом является значительно более высокая коррозионная стойкость по сравнению с припоем ВПр4.

Образцы для оценки коррозионной стойкости паяных соединений представляли собой две пластины толщиной 2 мм из сталей ЭИ961, ЭП410 и 12Х18Н10Т, спаянные между собой внахлест в различных сочетаниях. Для исключения влияния способа нагрева, состава газовой атмосферы и наличия флюса пайку образцов проводили в вакуумной печи сопротивления по рекомендуемому для припоев ВПр4 и ВПр50 режимам. После пайки образцы подвергали пескоструйной обработке для удаления измененного поверхностного слоя, который может негативно сказаться на коррозионной стойкости паяных соединений. Изменение поверхностного слоя при пайке в вакууме происходит из-за вакуумного травления при высокой температуре, в процессе которого элементы с высокой упругостью пара испаряются с поверхности образцов. Для сталей такой измененный поверхностный слой содержит в своем составе пониженное содержание хрома, и хотя имеет малую толщину при используемых режимах пайки (5–15 мкм), может негативно сказаться на коррозионной стойкости сталей, так как возможно формирование очагов коррозионных поражений.

Наиболее жесткое коррозионное воздействие, имитирующее работу топливных коллекторов в условиях тропического и морского климата, создается в камере солевого тумана [18–20]. Поэтому для оценки коррозионной стойкости и исследования характера коррозионных поражений паяные образцы подвергали испытаниям в камере солевого тумана в течение 6 мес.

После выдержки в камере солевого тумана производили фиксацию характера выделения продуктов коррозии на образцах, после чего продукты коррозии удаляли с образцов, а внешнюю поверхность паяного соединения исследовали с применением бинокулярного микроскопа. На отдельных образцах дополнительно исследовали микроструктуру на поперечных шлифах для установления характера распространения дефектов коррозионного происхождения.

Результаты и обсуждения

Исследование коррозионного состояния образцов соединения сталей 12Х18Н10Т–12Х18Н10Т

Внешний вид паяных образцов соединения сталей 12Х18Н10Т–12Х18Н10Т после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес представлен на рис. 1.

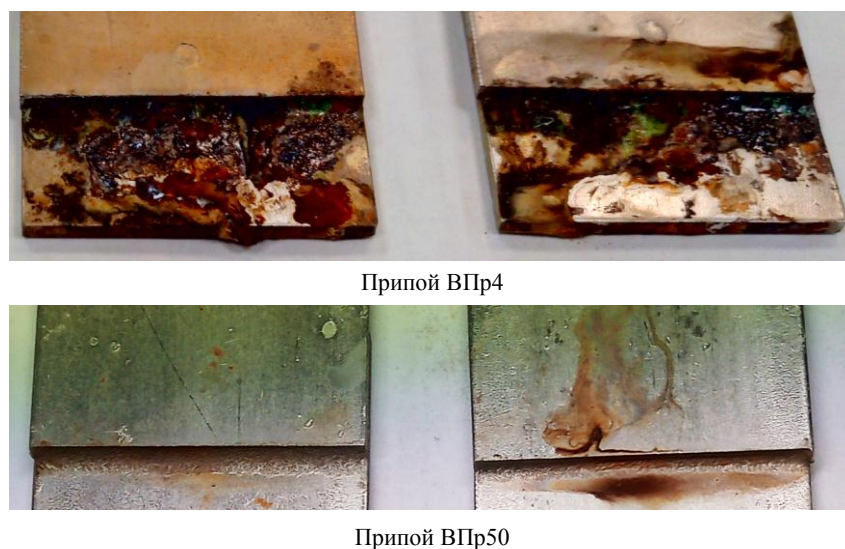


Рис. 1. Внешний вид паяных образцов соединения сталей 12Х18Н10Т–12Х18Н10Т после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

На паяных образцах, выполненных припоем ВПр4, в области галтели видно большое количество продуктов коррозии бурого и зеленого цвета. На пластинах из стали 12Х18Н10Т собственные продукты коррозии отсутствуют. Отдельные продукты коррозии имеют «затечный» характер, т. е. образовались не на пластине из стали, а стекали из галтельной области паяного соединения. Продукты коррозии зеленого цвета характерны для медных сплавов, что позволяет сделать предположение о протекании коррозионных процессов в припое ВПр4.

После удаления продуктов коррозии на образцах, выполненных припоем ВПр4, по всей протяженности паяного шва на галтели обнаружены значительные коррозионные повреждения в виде язв (рис. 2, а). При этом на пластинах из стали 12Х18Н10Т коррозионных повреждений как вдали от паяного шва, так и на границе зоны облуживания не обнаружено.

На паяных образцах, выполненных припоем ВПр50, продукты коррозии отсутствуют как на пластинах, так и в области галтели паяного шва. Галтель паяного соединения имеет равномерный металлический блеск. При исследовании образцов с применением бинокулярного микроскопа коррозионных повреждений также не обнаружено (рис. 2, б).

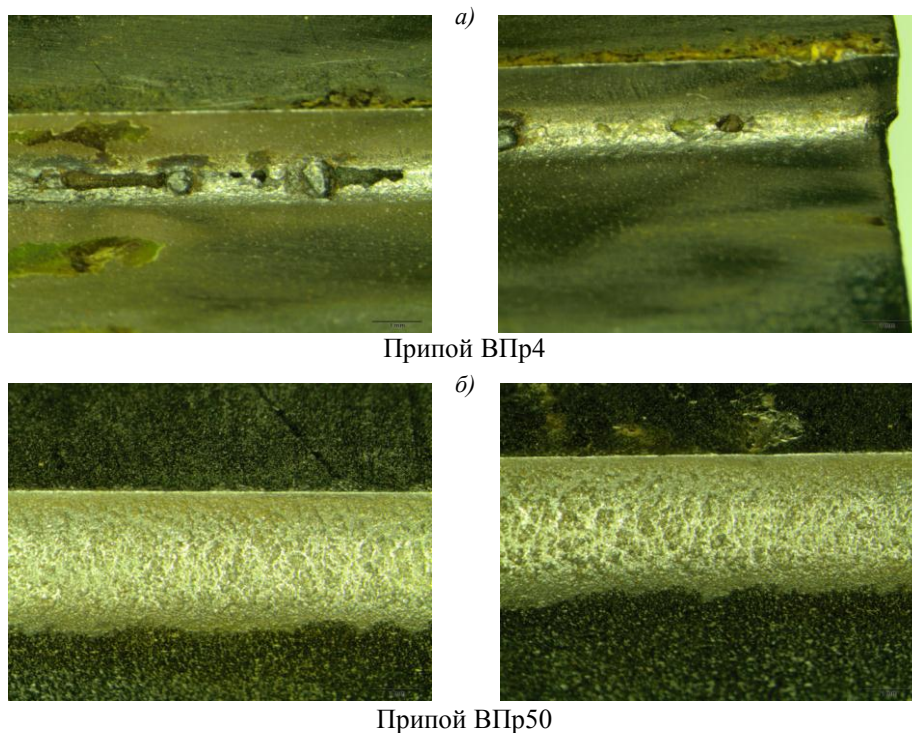


Рис. 2. Внешний вид галтели паяных образцов соединения сталей 12Х18Н10Т–12Х18Н10Т после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес и удаления продуктов коррозии

На основании приведенных результатов исследований видно, что припой ВПр4 обладает в данной системе наименьшей коррозионной стойкостью и в процессе эксплуатации может подвергаться коррозионному изъязвлению. Припой ВПр50, напротив, обладает высокой коррозионной стойкостью на уровне стали 12Х18Н10Т.

*Исследование коррозионного состояния образцов соединения сталей
12Х18Н10Т–ЭИ961*

Внешний вид паяных образцов соединения сталей 12Х18Н10Т–ЭИ961 после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес представлен на рис. 3.

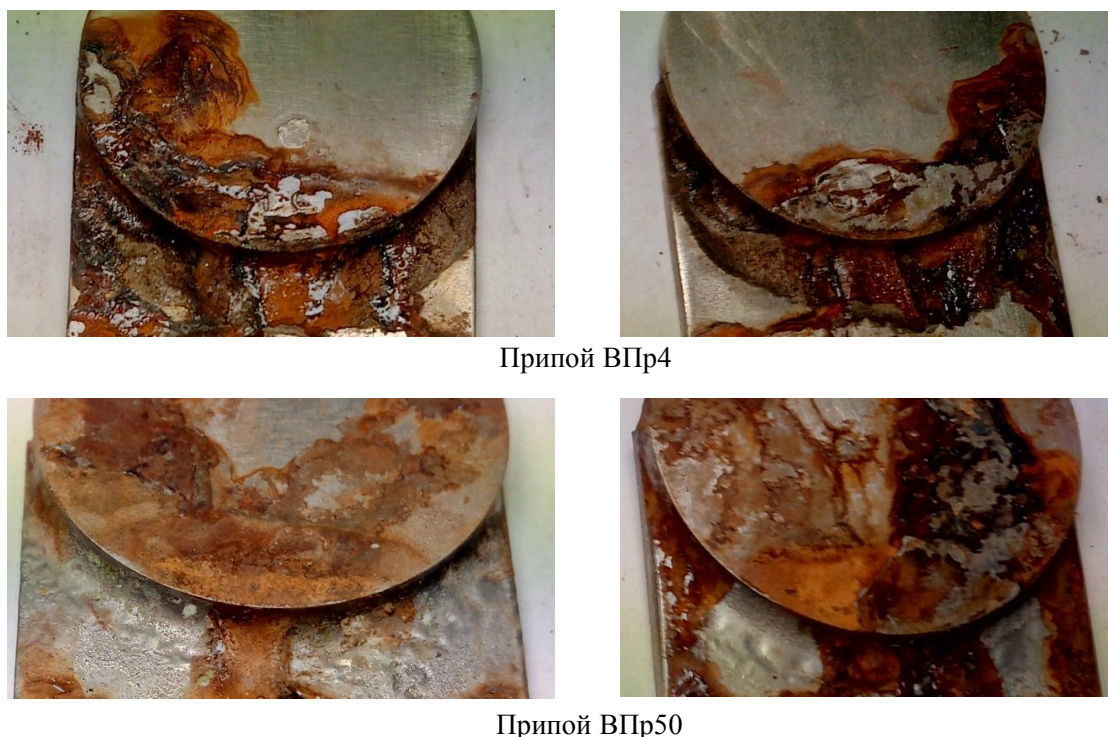


Рис. 3. Внешний вид паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭИ961 после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

На паяных образцах, выполненных припоем ВПр4, в области галтели наблюдается большое количество продуктов коррозии бурого цвета. На пластинах из стали 12X18H10T собственные продукты коррозии отсутствуют. Отдельные продукты коррозии имеют «затечный» характер, т. е. образовались не на пластине из стали, а стекли из галтельной области паяного соединения. Основная часть пластин из стали ЭИ961 свободна от продуктов коррозии. Большая часть продуктов коррозии сосредоточена в непосредственной близости от паяного соединения.

После удаления продуктов коррозии на образцах, выполненных припоем ВПр4, на галтели паяного соединения значительных коррозионных повреждений не обнаружено. Но на границе зоны облуживания на стали ЭИ961 обнаружены обширные (протяженностью до 7 мм) узкие (шириной до 2 мм) глубокие (до 1,5 мм) отдельные коррозионные язвенные повреждения (рис. 4 и 5). При этом коррозионных повреждений на слое припоя не обнаружено.

Видимо, данные коррозионные повреждения стали результатом действия контактно-щелевой коррозии, при которой при появлении коррозионного очага на границе «сталь ЭИ961–припой ВПр4» начинают интенсивно протекать коррозионные процессы, направленные вглубь стали ЭИ961 и не затрагивающие припой ВПр4. В результате такого коррозионного процесса образуется острый надрез, в котором скорость коррозии значительно возрастает в результате действия щелевого эффекта. Процесс коррозии идет настолько интенсивно, что образующиеся продукты коррозии из-за увеличения объема ломают тонкий слой полуды припоя. По характеру протекания коррозионных процессов можно сделать предположение, что в данной системе припой ВПр4 является электроположительным, в результате чего коррозия идет в первую очередь на стали ЭИ961.

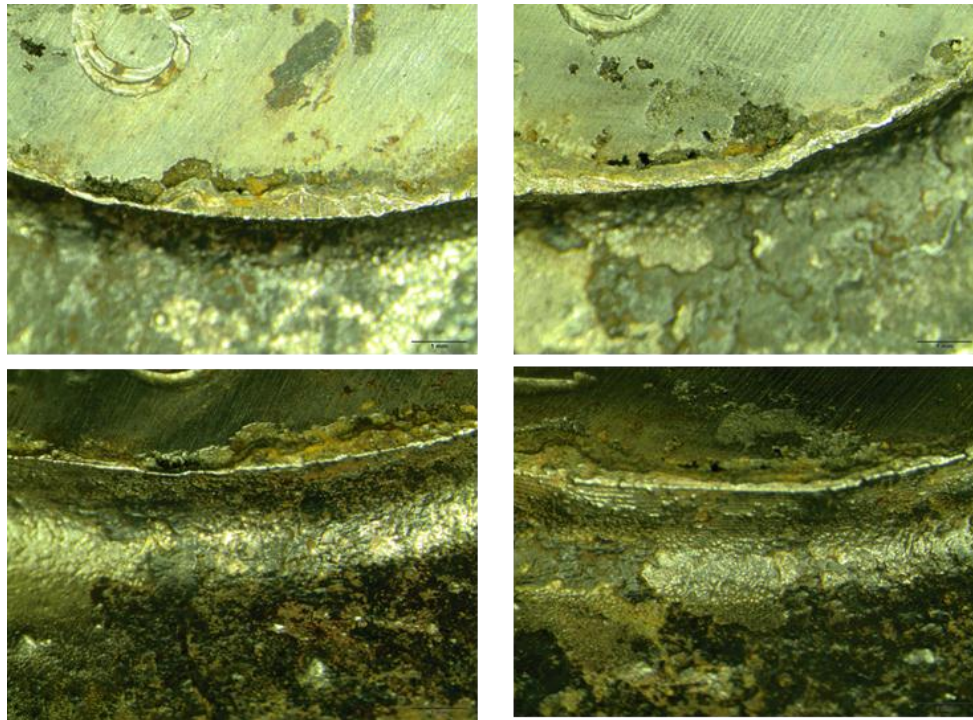


Рис. 4. Коррозионные повреждения паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭИ961, выполненных припоем ВПр4, после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

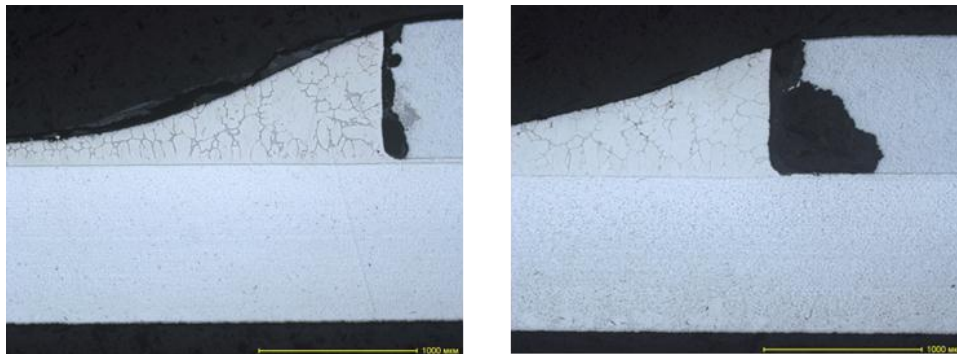


Рис. 5. Микроструктура паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭИ961, выполненных припоем ВПр4, после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

Аналогичная картина наблюдается и на образцах соединения сталей 12X18H10T–ЭИ961, выполненных припоем ВПр50 (рис. 6). Основными отличиями являются полное отсутствие коррозионных повреждений на галтели паяного соединения и несколько другой механизм развития коррозионных повреждений на стали ЭИ961 (рис. 7). На паяных образцах, выполненных припоем ВПр50, коррозия стали ЭИ961 носит преимущественно не контактно-щелевой, а щелевой характер, т. е. припой ВПр50 не оказывает столь существенного коррозионного воздействия на сталь ЭИ961. В данной системе быстрое развитие коррозионных дефектов вызвано исключительно щелевыми эффектами в самой стали ЭИ961, а припой ВПр50, возможно, оказывает провоцирующее действие на стадии образования поверхностного очага коррозии, который впоследствии развивается самостоятельно.

По результатам исследований видно, что припои ВПр4 и ВПр50 снижают коррозионную стойкость стали ЭИ961 за счет контактной электрохимической коррозии. При этом образование очагов коррозии на границе «сталь–припой», по-видимому,

происходит относительно медленно и случайным образом. Дальнейшая стадия развития коррозионных повреждений происходит значительно быстрее из-за щелевых эффектов. Такой характер развития коррозионных процессов очень опасен для топливных коллекторов, так как при этом вблизи паяных соединений формируется глубокий острый надрез, являющийся концентратором напряжений. В условиях работы топливного коллектора скорость роста коррозионных дефектов может дополнительно увеличиваться в результате действия знакопеременных усталостных нагрузок и формирования микротрещин механического происхождения.

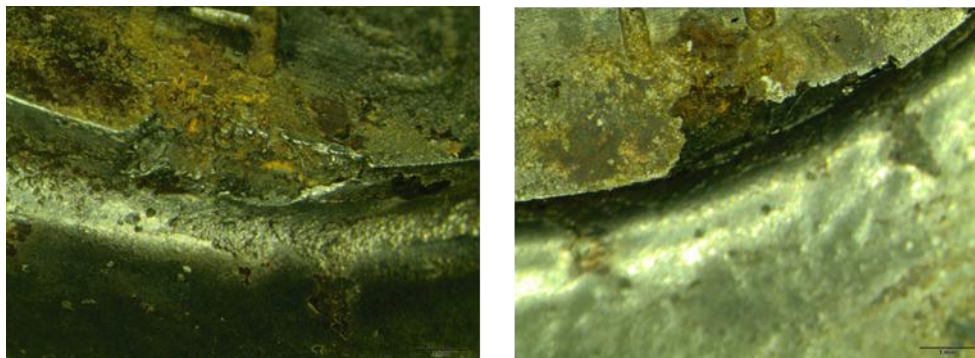


Рис. 6. Коррозионные повреждения паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭИ961, выполненных припоем ВПр50, после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

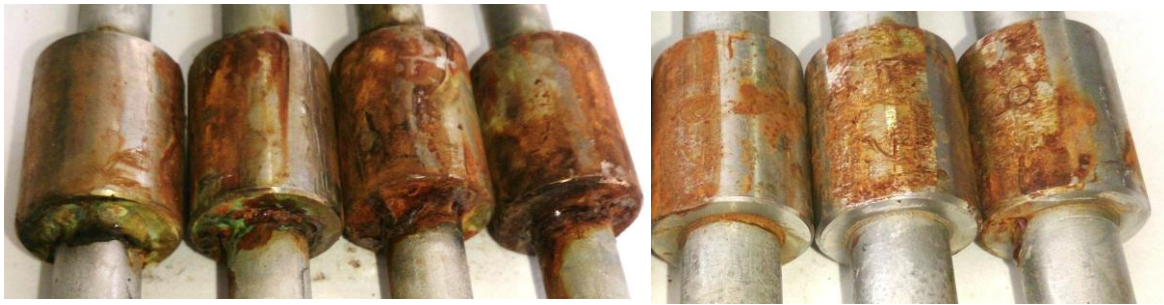


Рис. 7. Микроструктура паяных соединений образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭИ961, выполненных припоем ВПр50, после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

Исследование коррозионного состояния образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭП410

Для исследования коррозионной стойкости паяных соединений сталей 12X18H10T–ЭП410 использовали цилиндрические образцы «трубка–муфта». Трубки изготавливали из стали 12X18H10T, а соединительные муфты – из стали ЭП410. Внешний вид паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭП410 после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес представлен на рис. 8.

На паяных образцах, выполненных припоем ВПр4, в области галтели наблюдается большое количество продуктов коррозии бурого и зеленого цвета. На пластинах из стали 12X18H10T собственные продукты коррозии отсутствуют. Отдельные продукты коррозии имеют «затечный» характер, т. е. образовались не на пластине из стали, а стекали из галтельной области паяного соединения. Основная часть муфт из стали ЭП410 свободна от продуктов коррозии. Большая часть продуктов коррозии сосредоточена в непосредственной близости от паяного соединения.



Припой ВПр4

Припой ВПр50

Рис. 8. Внешний вид паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭП410 после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

После удаления продуктов коррозии на образцах, выполненных припоем ВПр4, на галтели паяного соединения значительных коррозионных повреждений не обнаружено. Но на границе зоны облуживания на стали ЭП410 обнаружены протяженные (до 4 мм) узкие (шириной до 1 мм) и глубокие (до 1,5 мм) отдельные коррозионные язвенные повреждения (рис. 9). Характер коррозионных повреждений схож с характером аналогичных повреждений для стали ЭИ961.

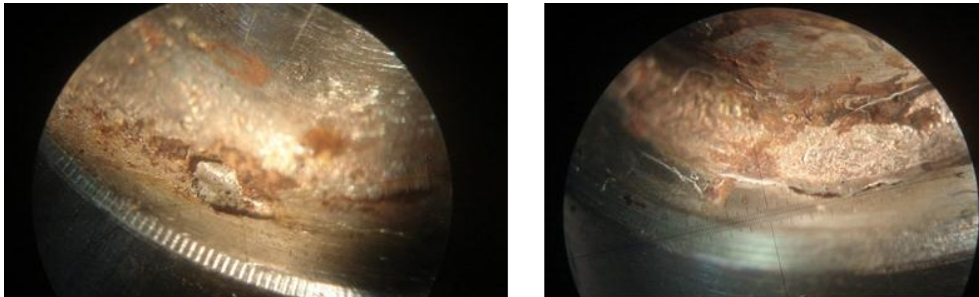


Рис. 9. Коррозионные повреждения паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭП410, выполненных припоем ВПр4, после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

При исследовании микроструктуры паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭП410 установлено, что коррозия носит контактно-щелевой характер и распространяется по границе «припой–сталь ЭП410» (рис. 10). Однако в отличие от стали ЭИ961 на стали ЭП410 граница коррозионных повреждений не ровная, а состоит из множественных коррозионных изъязвлений, уходящих вглубь стали ЭП410 по межзеренным пространствам, т. е. коррозионные повреждения носят смешанный характер – контактно-щелевой и межкристаллитный.

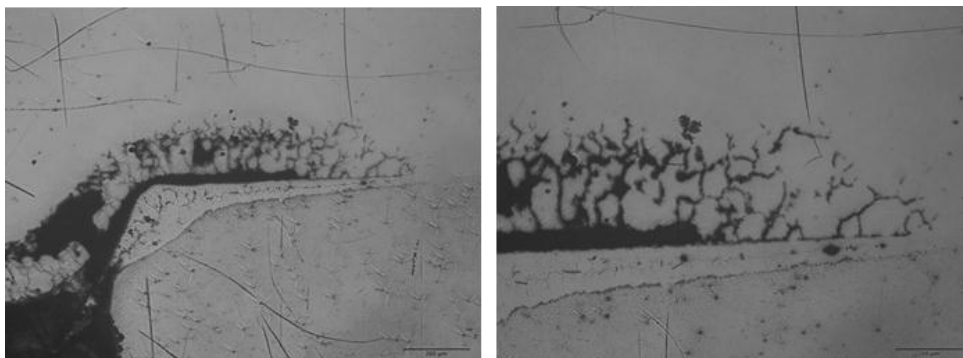


Рис. 10. Микроструктура паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭП410, выполненных припоем ВПр4, после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

После удаления продуктов коррозии на образцах, выполненных припоем ВПр50, на галтели паяного соединения и околошовных зонах коррозионных повреждений не обнаружено (рис. 11 и 12).

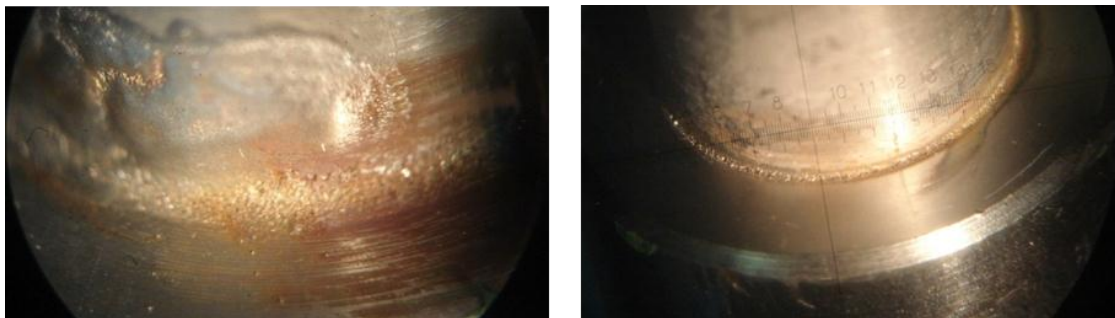


Рис. 11. Внешний вид галтели паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭП410, выполненных припоем ВПр50, после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

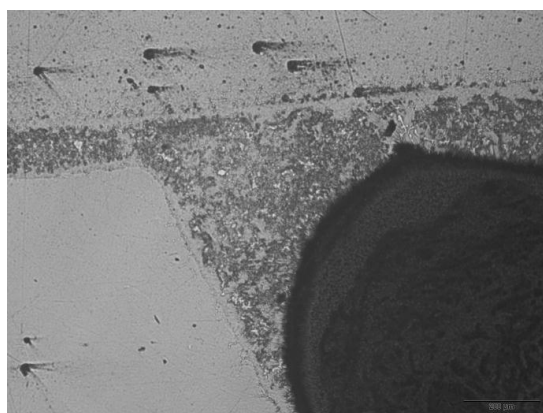


Рис. 12. Микроструктура паяных образцов соединения сталей 12X18H10T–ЭП410, выполненных припоем ВПр50, после выдержки в камере солевого тумана в течение 6 мес

По результатам исследований видно, что припой ВПр4 провоцирует контактно-щелевую и межкристаллитную коррозию стали ЭП410, что может быть потенциально опасно для топливных коллекторов. Припой ВПр50 в свою очередь не оказывает существенного коррозионного воздействия на сталь ЭП410.

Заключения

Приведены результаты работы по оценке коррозионной стойкости паяных соединений коррозионностойких сталей, применяемых при изготовлении топливных коллекторов ГТД, в условиях камеры солевого тумана. Выявлены основные виды коррозионных повреждений паяных соединений, выполненных припоями различных типов (на основе меди и никеля).

По результатам исследований установлено, что тип припоя оказывает существенное влияние на тип и механизм формирования коррозионных повреждений паяных соединений не только непосредственно в паяном шве, но и в околошовной зоне. Особенно сильно влияние припоя проявляется на малолегированных сталях с невысоким содержанием хрома.

В частности, на сталях ЭП410 и ЭИ961 припой ВПр4 в условиях интенсивного коррозионного воздействия способствует протеканию контактно-щелевой коррозии на границе «припой–основной материал». При этом коррозия интенсивно протекает в сталях ЭП410 и ЭИ961, практически не затрагивая сам паяный шов.

Припой ВПр50 в тех же условиях ведет себя не столь однозначно. Влияния припоя ВПр50 на развитие коррозионных повреждений стали ЭП410 не обнаружено, а на стали ЭИ961 этот припой, возможно, провоцирует появление очагов коррозии вблизи паяного соединения. При этом в отличие от припоя ВПр4 в дальнейшем развитии коррозионных повреждений припой ВПр50, по-видимому, не участвует, так как затем коррозия носит щелевой характер и распространяется в стали ЭИ961 без пространственной ориентации относительно положения паяного шва, выполненного припоем ВПр50.

Оба исследованных припоя (ВПр4 и ВПр50) не оказывают коррозионного влияния на сталь 12Х18Н10Т, обладающую среди исследованных сталей наибольшей коррозионной стойкостью. По результатам исследований припой ВПр50 обладает коррозионной стойкостью на уровне аналогичной характеристики для стали 12Х18Н10Т, так как коррозионных повреждений не обнаружено ни в основном материале, ни на галтели паяного соединения. Припой ВПр4 в данной системе обладает более низкими показателями коррозионной стойкости по сравнению со сталью 12Х18Н10Т, так как на галтели паяного соединения обнаружены поверхностные коррозионные повреждения.

Таким образом, припой ВПр4 обладает более низкой, по сравнению с припоем ВПр50, коррозионной стойкостью, но при этом в отличие от припоя ВПр50 оказывает существенное коррозионное влияние на коррозионностойкие стали ЭП410 и ЭИ961, при этом не корродируя в данных паяных соединениях.

Для выявления причин такого коррозионного влияния припоев и подтверждения предположений о характере коррозионных процессов, происходящих в паяных соединениях коррозионностойких сталей, необходимо проведение дополнительных исследований с использованием методов измерения электрохимических потенциалов сложной системы «сталь–припой–сталь» и микрорентгеноспектральных методов изучения переходных зон, формирующихся между припоем и соединяемыми материалами.

Однако уже на данном этапе исследований видно, что при использовании сталей с невысоким содержанием хрома в среде с повышенной коррозионной активностью паяные соединения необходимо подвергать антикоррозионной защите.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2016. №1. С. 1–15.
4. Ветрова Е.Ю., Щекин В.К., Курс М.Г. Сравнительная оценка методов определения коррозионной агрессивности атмосферы // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
6. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.
7. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

8. Рыльников В.С., Лукин В.И. Припои, применяемые для пайки материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2013. №8. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2020).
9. Aminazad A.M., Nadian A., Ghasimakbari F. Investigation on Corrosion Behaviour of Copper Brazed Joints // *Prosedia Materials Science*. 2015. Vol. 11. P. 672–678. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.11.024.
10. Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Красиков М.И. Исследование ремонтной технологии исправления дефектов паяных соединений топливных коллекторов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2013. №12. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2020).
11. Klapper H.S., Zadorozne N.S., Rebak R.B. Localized Corrosion Characteristica of Nickel Alloys // *Acta Metallurgica et Materialia*. 2017. Vol. 30. P. 296–305. DOI: 10.1007/s40195-017-0553-z.
12. Лукин В.И., Рыльников В.С., Старова Л.Л., Иода Е.Н., Ковальчук В.Г., Голев Е.В. Сварка и пайка в авиастроении // *Авиационные материалы. 75 лет. Избранные труды: юбил. науч.-техн. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 132–141.*
13. Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Шевченко О.В. Перспективные разработки в области высокотемпературной пайки жаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №9. С. 144–158.
14. Жиликов В.П., Рыльников В.С. Особенности коррозии паяных соединений // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. №7. С. 7–9.
15. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Припои на никелевой основе для пайки жаропрочных сплавов и сталей // *Сварочное производство*. 2014. №7. С. 36–42.
16. Чулков Е.И., Иванов М.А., Белова Е.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Рыльников В.С. Пайка высокотемпературным припоем трубопроводов из стали 12X18H10T в защитной атмосфере с применением локального индукционного нагрева // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн*. 2014. №5. Ст. 10. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 21.10.2020).
17. Рыльников В.С., Лукин В.И. Новые разработки припоев для пайки никелевых сплавов и сталей // *Пайка в машиностроении: тезисы докладов*. Тольятти: ТПИ, 1991. С. 51–52.
18. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Киричок П.Ф., Фомина М.А. Ускоренные и циклические коррозионные испытания авиационных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2019. №10 (82). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-61-75.
19. Варченко Е.А., Курс М.Г. Натурные испытания металлических материалов в морской воде: ключевые подходы к оценке стойкости к коррозии и биоповреждению // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2017. №11 (59). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-12-12.
20. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №1 (54). С. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.