

УДК 621.454.2.71 : 621.791.3.62

В.А. ТКАЧЕВ¹, А.К. ФЕДЮЧУК², Н.Е. КАЛИНИНА³

¹*Государственное конструкторское бюро «Южное», Украина*

²*ГП производственное объединение «Южный машиностроительный завод», Украина*

³*Днепропетровский национальный университет, Украина*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПАЯНЫХ ПАНЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

В статье рассмотрен технологический процесс изготовления крупногабаритных паяных панелей теплообменника специальной системы терморегулирования аппаратуры системы управления ракетносителя. Выбраны материалы входящих деталей, порошковый припой, связующее для приготовления пасты, обеспечившие заданный уровень качества, надежности и ресурса работы при приемлемой себестоимости изготовления изделия.

теплообменник, панели, нержавеющие стали, технология, кислотостойкие припои, паяльная паста, связующее, прочность, коррозионная стойкость

Введение

Современные украинские ракетносители (РН) «Циклон», «Зенит» и «Днепр» успешно участвуют в международных программах. Для поддержания требуемого температурного режима непрерывно работающих приборов в некоторых РН, спроектированных ГКБ «Южное» и изготовленных ГП ПО «ЮМЗ», разработана и применена специальная система терморегулирования (СТР) аппаратуры системы управления, не имеющая аналогов в отечественном ракетостроении [1].

В этой системе используются теплообменники системы терморегулирования, состоящие из 32 паяных крупногабаритных гофрированных панелей с теплоносителем «Днепр», представляющим собой 40%-ный водный раствор этиленгликолевого спирта. Тонкостенные панели размером 1360 × 660 × 15 мм выполнены в виде двухслойной конструкции из сталей 12X18H10T и 12X21H5T, соединение обшивок которой осуществляется высокотемпературной пайкой через регулярно профилированную гофрированную проставку толщиной 0,4 мм (варианты с 1 или 2 проставками высотой 7 мм и шагом 10 мм).

С точки зрения экономики пайка удовлетворяет всем требованиям современного производства: значительно способствует уменьшению трудоёмкости,

снижению массы и стоимости изделия при одновременном улучшении его качества и повышении экономии металла. При этом нанесение припоев при сборке крупногабаритных узлов под пайку является одной из самых трудоемких и ответственных операций. Для получения качественных паяных соединений в гофрированных тонкостенных конструкциях наиболее благоприятно наличие тонкого слоя (менее 100 мкм) припоя на всей паяемой поверхности хотя бы одной из соединяемых деталей. Операции дозированного нанесения припоя весьма трудоёмки. Применяемые на предприятиях отрасли кислотостойкие припои системы никель – хром – марганец ПЖК-35, Г70НХ, Г40НХ в виде фольги не обеспечивают качественную пайку больших и неравномерных соединительных зазоров (из-за коробления), особенно в среде вакуума из-за испарения марганца, что приводит к увеличению затрат при изготовлении деталей крупногабаритных узлов с минимальными допусками. Для массово выпускаемых паяных изделий типа крупногабаритных гофрированных панелей целесообразно применять пастообразные припои, которые легче и быстрее можно наносить на паяемые (с большой площадью) поверхности соединений с помощью разнообразных приспособлений или вручную. Поэтому возникла необходимость в выборе порошкового припоя и связующего для его

нанесения, исследовании взаимодействия этих материалов с основными паяемыми материалами и разработке технологии пайки крупногабаритных тонкостенных гофрированных панелей из нержавеющей сталей.

1. Формулирование проблемы

В поставленной задаче паяные соединения должны обеспечивать работоспособность узла при одновременном воздействии агрессивных сред, давления (длительная, более 10 лет, непрерывная циркуляция теплоносителя типа «Днепр-40» под давлением не менее 20 кгс/см²). Для пайки таких конструкций наиболее приемлемыми являются отечественные никелевые припои 6МА, 5А, №5, 5ВА, 5МВ, ВПр-7, ВПр-8, ПЖК-35, Г70НХ, Г40НХ, ВПр-1, ВПр-4 и др. (табл. 1), разработанные в ВИАМ и

НИИТМ, и предназначенные для пайки узлов самолетов и специальных реактивных двигателей [2, 3]. Первые семь из них – труднодеформируемые припои, именно поэтому их изготавливают в виде порошков. Остальные – относительно пластичны. Их изготавливают в виде фольги толщиной 0,1 – 0,15 мм. Многокомпонентные припои, в том числе Г70НХ и ПЖК-35, получить химическими или напыленными покрытиями невозможно. Изготовление их в виде порошка не налажено.

Применяемые на предприятиях отрасли кислотоустойчивые припои системы никель – хром – марганец ПЖК-35, Г70НХ, Г40НХ не обеспечивают качественную пайку больших и неравномерных (из-за коробления) соединительных зазоров, что приводит к увеличению затрат при изготовлении крупногабаритных узлов.

Таблица 1

Припои для пайки теплообменников

Классификация по основному компоненту	Марка припоя	Температура, °С:		Область применения
		плавления	пайки	
Медно-никелево-марганцевый	ВПр4	940 – 980	1000 – 1050	Пайка теплообменных аппаратов смесительных устройств, корпусных сборочных крыльчаток; колёс турбин из сталей, жаропрочных сплавов, активированной керамики, графита, медно-графита, меди, медных сплавов
Медно-никелевый	ВПр1	1100 – 1120	1180 – 1200	
Никелево-марганцевый	ПН52 (ВПр7) ВПр8			
Никелевый (порошковые)	ПН75п(№5) ПХ13Н75СР	1030 – 1100	1200 – 1240	Пайка теплообменных аппаратов, трубопроводов; герметизация отливок из сталей и жаропрочных сплавов
	ПН74п(№А) ПХ12Н75СР			
	ПН68п(5Н) ПХ13Н69Р			
	ПН55п(5В) ПХ10Н6415С7Р			
	ПН67п(5АН) ПХ12Н70С7Р			
	ПН60п(6А) ПХ10Н64М15С7Р	1010 – 1080		

Эти припои плохо удерживаются в неравномерных и широких паяемых зазорах, образуют паяные

швы с повышенной пористостью. Припои изготавливаются в виде лент или фольги толщиной

0,1 – 0,15 мм, имеют по кромкам трещины, внутренние дефекты (расслоения и др.), волнистость, и на практике их необходимо вручную вырезать. При этом отходы составляют до 40%. Для нанесения оптимального количества припоя (при толщине более 0,1 мм) приходится нарезать полосы шириной 2 – 20 мм, распределять их по паяемой поверхности согласно ранее отработанным схемам с предварительной разметкой, крепить при помощи точечной конденсаторной сварки. Наличие участков без припоя создаёт предпосылки для получения неоднородных по размерам и структуре паяных соединений, дефектов типа заплывов или скоплений припоя в каналах трактов, непропаев, сужений швов, уменьшенных галтелей. Таким образом, производство паяных крупногабаритных конструкций довольно трудоемко. Одной из наиболее трудоёмких операций является нанесение припоя, в том числе припоя в виде фольги.

Для соединений коррозионностойких сталей с некапиллярными зазорами нашли применение порошковые припои системы никель – хром – кремний, например, № 5 и № 5Н. В такие припои вводят железо – для повышения пластичности паяных соединений, и бор – для повышения флюсующих свойств.

Отличительной особенностью этих порошковых припоев является образование достаточно плотных швов в неравномерных зазорах. Это подтверждает многолетний опыт применения припоя № 5Н, хорошо себя зарекомендовавшего при изготовлении трубчатых узлов (сопел) камер сгорания, по конструкции принципиально отличающихся от облочковых сопловых блоков классически фрезерованных или гофрированных конструкций, внедренных в отрасли [2].

Конструкция, паяемые материалы и состав используемых припоев защитной среды, а также толщина паяного шва оказывают существенное влияние на качество продукции. Поэтому при разработке

технологии изготовления панелей теплообменника специальной системы терморегулирования аппаратуры системы управления СТР ракетносителя стало необходимым комплексное решение всех технологических вопросов высокотемпературной пайки, включающее выбор материалов, способов подготовки паяемых поверхностей, режимов пайки, оборудования.

2. Решение проблемы

Как показали результаты многих исследований, прочность паяных соединений при контакте со средой (внешней и эксплуатационной) существенно зависит от технологии получаемых соединений и сильно реагирует на отклонения от оптимальных условий.

На основании механических и технологических свойств, полученных испытанием образцов, невозможно сделать заключения о прочностных свойствах паяного соединения и конструкции в целом. Необходимы натурные испытания таких конструкций, которые в полной мере отражают влияние величины и формы соединяемых поверхностей, химических составов спаянных материалов, ширины зазоров, технологических параметров [3].

По результатам предварительных экспериментальных работ нами было установлено: подготовка паяемых поверхностей сталей 12Х18Н10Т и 12Х21Н5Т электрохимическим полированием, вместо никелирования, позволяет получать качественно сформированные жаропрочные кислотостойкие паяные порошковыми припоями 5Н, № 5 (PгХ13Н75С7Р) соединения.

Поверхность деталей под пайку подвергали электрохимическому полированию вместо широко распространенного гальванического никелирования, которое не всегда обеспечивает равномерность слоя и прочность сцепления с подложкой. Завышенная толщина покрытия никеля не может полностью раствориться в процессе пайки и привести к снижению прочности паяного узла. Во всех химических про-

цессах участвуют биологически трудно разлагаемые компоненты, которые загрязняют окружающую среду, сточные воды. Проведенные нами исследования показали, что для пайки сборочных единиц РКТ, в том числе и теплообменников, жаропрочными хромоникелевыми припоями, достаточен способ подготовки паяемых поверхностей электрохимическим полированием. Он может быть заключительной операцией перед нанесением припоя и сборки узлов под пайку. Хорошо электрохимически полируются стали типа аустенитных. К достоинствам этого метода следует отнести стабильность качества, экономичность, возможность проведения визуального контроля состояния качества (удовлетворительный блеск по эталонному образцу).

Определение прочностных характеристик паяных пастой жаропрочного кислотостойкого припоя № 5 соединений (при комнатной и повышенных температурах) проводилось на стандартных образцах с нахлесточным соединением, изготовленных из сталей 12X18H10T, 12X21H5T и в разных сочетаниях. Пайка образцов в печи осуществлялась в среде аргона и в вакууме не ниже 1×10^{-2} мм. рт. ст. при температуре 1200 – 1220 °С. Величина сборочных зазоров равнялась 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 мм. После пайки в печи образцы подвергались механическим испытаниям при комнатной температуре. Влияние величины зазоров на прочность паяных соединений на срез показано на рис. 1, из которого следует, что прочность паяных соединений на срез зависит от величины сборочного зазора.

Это объясняется строением структуры паяного шва: чем больше величина зазора, тем неоднороднее структура зоны сплавления шва и тем ниже прочность паяного соединения. Соответственно, чем меньше сборочный зазор, тем структура паяного соединения однороднее и тем выше его прочность (рис. 2).

Для исследуемых порошковых припоев оптимальной величиной следует считать зазор до

0,15 мм, хотя и при величине зазора 0,4 мм паяный шов обладает сравнительно высокой прочностью, что весьма важно при изготовлении паяных крупногабаритных жестких конструкций, претерпевающих деформации (коробление). Качество формирования паяных соединений в больших неравномерных зазорах с небольшой величиной нахлестки (шириной) соединения определялось на макетных образцах типа «портсигар», имитирующих натурные узлы, изготовленные из сталей 12X18H10T и 1X21H5T.

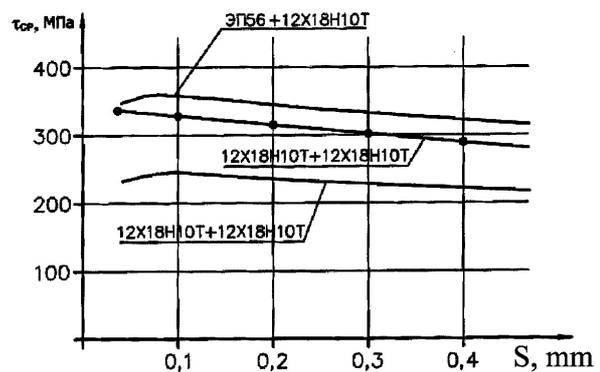


Рис. 1. Влияние величины зазора (S) на прочность ($\tau_{ср}$) паяных соединений:
 — припой 5;
 —●— припой ПЖК-35;
 $\tau_{ср}$ — предел прочности, на срез

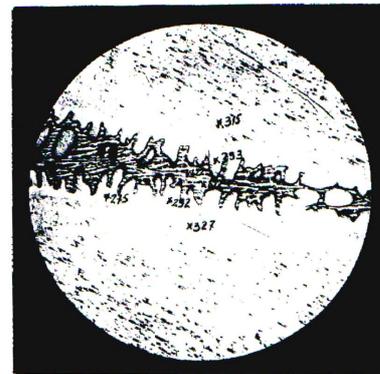


Рис. 2. Микроструктура двухфазного паяного шва, (цифры – значения микротвердости; ПМТ-3, нагрузка 30 г)

Величина неравномерного сборочного зазора достигала до 0,2 мм, ширина шва – 3 мм. Все паяные макетные образцы оказались герметичными ($P_{исп.} = 20$ кгс/см²). Разрушение образцов наблюдалось по паяному шву с остаточной деформацией основного металла. Последующее изготовление представительного количества натурных узлов (с полным

Таблица 2

Характеристики механической прочности паяных припоем № 5 соединений

Материал образца	Состояние материала	Прочность σ , МПа			Удлинение δ , %			
		Температура испытаний, °С						
		20	400	800	-196	20	400	800
ЭИ811 с никелевым покрытием	В состоянии поставки	732	456	136	1380	20	16,2	29,3
1Х18Н10Т		567	417	221	1510	56,1	35,3	40,3
ЭИ811	Обслуженные припоем 5 при 1180 °С в среде аргона	534	364	122	963	9,5	10,3	13,6
1Х18Н10Т		415	334	161	1059	15,2	17,8	21,5
1Х18Н10Т + ЭИ811 с никелевым покрытием	Паяные припоем 5 в аргоне при 1180 °С	Прочность τ_{cp} , МПа						
		276*	197*	77*	–	–	–	–

* образцы разрушились по основному материалу (ЭИ811) вблизи соединения.

объемом необходимых испытаний) прошло успешно (с требуемыми запасами характеристик – как квалификационные испытания), что подтверждает высокую работоспособность таких паяных конструкций.

Степень влияния припоя на механические свойства паяемых материалов определялась путем сравнения результатов, полученных при испытаниях образцов в исходном состоянии и в контакте с припоем (табл. 2).

Дополнительным подтверждением качества и надежности паяных припоем № 5 конструкций стали результаты разработки технологии изготовления имитатора теплообменника и отдельного узла двигателя, которые проводились с опробованием сборки и пайки узлов (с зазорами от 0,03 до 0,3 мм на диаметр) припоями Г70НХ, ПМ17, № 5, с покрытием никель – марганец. При использовании в качестве припоя гальванического покрытия никель – марганец (20 мкм) – качество пайки удовлетворительное, давление разрушения 400 кгс/см². При пайке лентой припоя Г70НХ с зазором 0,3 мм – качество пайки удовлетворительное. Однако имеются концевые непропаи с одного торца узла. При пайке через припой №5 (слой 90 – 120 мкм) с зазором 0,3 – 0,46 мм (1220 – 1230 °С, 30 мин, вакуум 1×10^{-2} мм. рт. ст., давление аргона в печи 3 кгс/см²) качество пайки удовлетворительное, давление разрушения узлов – имитаторов составляло 580, 650 кгс/см². При испы-

тании один узел не разрушился при давлении 700 кгс/см². Припоем № 5 было спаяно 16 узлов, из них 15 узлов установили на изделия. Из опробованных вариантов наилучшие результаты получены при пайке порошковым припоем № 5, при этом паяемые зазоры составляли 0,3 – 0,46 мм, т.е. в 1,5 раза больше.

Порошковые припои типа № 5, изготовленные из расплава распылением аргоном или азотом по ТУ 14-1-3178-81, не загрязнены нежелательными примесями, частицы имеют сферическую форму, гладкую, чистую поверхность (не имеют окисных пленок) и являются более приемлемыми для нанесения методами распыления.

Для пайки деталей и узлов из нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов во многих отраслях промышленности используются паяльные пасты различных припоев и связующих. Нами разработана и проверена в производстве паяльная паста, исключая использование огнеопасных связующих. В рекомендуемой паяльной пасте используется 4%-ный водный раствор поливинилового спирта, который является нетоксичным, водорастворимым связующим, так как не содержит растворителей, а двухромовокислый калий служит антикоррозионной добавкой. Приготовленная на основе указанного выше состава связующего паяльная паста технологична, обладает седиментационной устойчивостью,

не теряет в процессе хранения своих свойств до 10 суток, исключает науглероживание металла. Из-за полного выгорания низкотемпературного связующего в интервале температур 100 – 500 °С образование на паяемой поверхности твердых остатков, затрудняющих формирование паяного шва и снижающих чистоту внутренних закрытых полостей, исключено. Введение антикоррозионной добавки двуххромовокислого калия предотвращает окисление паяемых поверхностей, что улучшает качество пайки и позволяет проводить ее в среде инертного газа или в вакууме, в том числе конструкций с закрытыми труднодоступными полостями; не загрязняет оборудования и не снижает срока службы вакуумного масла насосов при пайке в вакууме. Паяные соединения, полученные с применением этой пасты, хорошо сформированы, достаточно прочны, без неметаллических включений, затрудняющих формирование паяных соединений. Предел прочности паяного припоем № 5 соединения со сталью 12X18H10T составляет 355 – 407 МПа при 20 °С.

Паста содержит компоненты в следующем соотношении (масс.%): водный раствор поливинилового спирта (ПВС) – 10 – 50; двуххромовокислый калий – 1,3 – 1,5; порошковый припой № 5 – остальное.

Использование данной пасты улучшает качество паяных конструкций благодаря отсутствию науглероживания основного металла, токсичных веществ, за счет повышения чистоты их внутренних полостей, введению биологически безвредного, водорастворимого связующего на основе поливинилового спирта. Использовать пасту можно в любых производственных условиях без применения систем вытяжной вентиляции, что очень важно при нанесении ручным способом. При этом снижаются противопожарные требования, так как не применяются легко воспламеняющиеся вещества, особенно при массовом производстве с использованием высокопроизводительного оборудования для безвоздушного или воздушного распыления.

Коррозионная стойкость в различных средах высокотемпературных припоев ПЖК-35, Г70НХ, № 5, применяемых в отрасли, и соединений, выполненных ими, достаточно изучены. В настоящее время функционируют соответствующие гарантийные ведомости по работоспособности паяных соединений. Скорость коррозии зависит от химического и фазового состава припоя и сталей, окружающей среды, условий эксплуатации. Наличие опыта успешного использования таких паяных конструкций в других космических проектах, предусматривающих аналогичные или более напряженные условия эксплуатации, подтверждает возможность их широкого применения в дальнейших разработках. Коррозионная стойкость паяных соединений, выполненных никелевыми припоями, в тропическом климате и промышленной атмосфере – удовлетворительная. В теплоносителе типа «Днепр-40» она также удовлетворительная, что подтверждено испытаниями.

В результате проведенных работ определены оптимальные технологические параметры: толщина слоя покрытия припоя и/или его количество по привесу, состав пасты с различными связующими, режим высокотемпературной пайки. Время разрыва между операциями – электрохимическим полированием, нанесением пасты припоя, сборкой и пайкой, – может составлять до 30 суток, что приемлемо даже для мелкосерийного производства. На паяемые поверхности обшивок наносится паста порошкового припоя № 5 по разработанным технологиям. Все паяемые детали панелей просты в изготовлении и собираются в пакет. Паяные соединения расположены в удобном для печной пайки горизонтальном положении в рабочей зоне печи ИП-500, дооснащенной специально разработанным водоохлаждаемым грузочным приспособлением, стационарно устанавливаемыми секциями муфеля вместо вращающегося контейнера. Кроме того, при пайке панелей для получения качественных паяных швов обеспечивается плотный контакт соединяемых по-

верхностей за счет перепада давлений, использования специальной технологической оснастки. Важнейшим условием, определяющим качество паяных соединений этих панелей, является обеспечение наличия припоя и плотного контакта по линиям касания гофр и обшивок в местах соединения (зазоры не более 0,15 мм), что обеспечивается также и поджигом паяемых деталей панелей в процессе нагрева и охлаждения при пайке. Для удаления продуктов разложения связующего из внутреннего объема паяемых пакетов применена система продувки аргоном. Качество пайки панелей теплообменников контролируется внешним осмотром, рентгеновским просвечиванием, гидроиспытаниями на прочность при давлении до 600 МПа, пневмоиспытаниями на герметичность и металлографическими исследованиями выборочных узлов.

По отработанному и внедренному технологическому процессу изготовление паяных панелей осуществляется по следующей схеме: изготовление входящих деталей, подготовка паяемых поверхностей под пайку, нанесение на паяемые поверхности обшивок припоя: сборка, сварка по периметру и приварка коллекторов, пайка в печи ИП-500, сварка кронштейнов, контроль качества.

Последующее изготовление представительного количества натуральных узлов с полным объемом необходимых испытаний подтверждает высокую работоспособность паяных панелей теплообменника СТР ракетносителя.

В разработанной и внедренной технологии производства панелей теплообменников системы терморегулирования ракеты применены принципиально новые технологические процессы и оборудование.

Заключение

В ГП ПО «ЮМЗ им. А.М. Макарова» совместно с ГКБЮ разработана и внедрена новая технология, для изготовления паяных крупногабаритных панелей теплообменника СТР ракетносителя. Разрабо-

таны принципиально новые технологические процессы подготовки теплообменников под пайку со снижением трудоемкости и механизацией ряда операций. В результате проведенных работ была установлена возможность:

- замены ленточных припоев, ПЖК-35, Г70НХ, ПМ-17 порошковыми, в том числе и припоями типа 5А, 5, 5Н, ВПр – 4, изготавливаемых распылением из расплавов;

- использования для паяльных паст в качестве связующих на основе поливинилового спирта вместо акриловой смолы;

- механизации нанесения порошковых припоев пульверизацией, воздушным или безвоздушным распылением;

- замены никелевого покрытия толщиной 3 – 12 мкм на паяемых поверхностях деталей их электрохимическим полированием с визуальным контролем качества вместо разрезки и металлографического контроля.

Прочность и коррозионная стойкость паяных соединений припоем системы никель – хром – кремний – бор теплообменников СТР соответствует требованиям конструкторской документации на изделия.

Литература

1. Конюхов С.Н. Развитие ракетного двигателестроения в ГКБ «ЮЖНОЕ» // Космическая техника. Ракетное вооружение. – Днепропетровск: КБ «Южное». – 1998. – Вып. 1 – 2.
2. Шнякин В.Н. Создание жидкостных ракетных двигателей специального назначения в ГКБ «Южное» // Космическая техника. Ракетное вооружение. – Днепропетровск: КБ «Южное». – 1998. – Вып. 1 – 2.
3. Справочник по пайке / Под ред. И.Е. Петрунина. – М.: Машиностроение, 2003. – 372 с.

Поступила в редакцию 20.12.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ф. Санин, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.