

М333 409

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования

СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

Цумарев Юрий Алексеевич

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАПИЛЛЯРНОЙ ПАЙКИ
И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ
МЕДНО-АЛЮМИНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ЭКСПЛУА-
ТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

(Специальность 05.04.05 -Технология
и машины сварочного производства)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1978

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

Цумарев Юрий Алексеевич

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАПИЛЛЯРНОЙ ПАЙКИ
И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ
МЕДНО-АЛЮМИНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ЭКСПЛУА-
ТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

(Специальность 05.04.05 -Технология
и машины сварочного производства)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1333409

Цумарев Ю. А. Исследование

Москва

1978

а выполнена в Могилёвском машиностроительном
институте.

Учёный руководитель – д.т.н., профессор Лашко С.В.

Учёный консультант – к.т.н., доцент Березиенко В.П.

Специальные оппоненты: д.т.н., профессор Стеклов О.И.,

к.т.н., доцент Долгов Ю.С.

Исходящее предприятие – трест "Запхимремстроймонтаж", г. Минск.

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1978 г.

на заседании специализированного Совета по технологии и маши-
нам сварочного производства Московского ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшего технического училища
имени Н.Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская, 5.

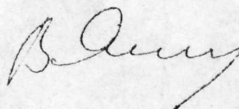
Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
имени Н.Э. Баумана.

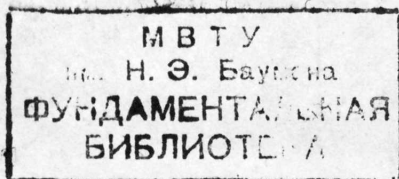
Автореферат разослан "_____" _____ 1978 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

доктор технических наук, доцент

 Ямпольский В.М.

1.71857 Подп.к печ. 7.06.78 Объем I п.л. Тир.100, тип.МВТУ, зак.786



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время быстрыми темпами возрастает выпуск различного холодильного оборудования, трубчатая теплообменная аппаратура которого имеет неразъемные телескопические соединения алюминиевый сплав-медь. В процессе эксплуатации таких соединений, получаемых преимущественно методами сварки давлением, возможно нарушение герметичности и снижение прочности, вызванное реактивной диффузией, процессами коррозионного разрушения и воздействием тепловых ударов. Разработанные до настоящего времени методы получения неразъемных соединений алюминий-медь не позволяют в монтажных условиях получать конструкции, сохраняющие работоспособность при глубоком их охлаждении. Таким образом, решение проблемы получения неразъемных соединений алюминий-медь в специфических условиях ремонта трубопроводов воздухоразделительных установок является актуальной задачей, отвечающей насущным нуждам промышленности.

Целью настоящей работы явилось изучение процесса образования трубных соединений алюминий-медь, паянных по технологическому покрытию, и выявление особенностей и условий формирования паяного шва; исследование собственных термических напряжений в паяном телескопическом соединении разнородных металлов и их влияния на работоспособность конструкций. Исследование условий получения паяного соединения, отвечающего предъявляемым к нему требованиям по работоспособности, проводилось в соответствии с условиями эксплуатации трубопроводов воздухо-разделительных установок.

Методы исследования. В работе экспериментальные исследования сочетались с теоретическими разработками. Основными методами экспериментальных исследований являлись рентгенографическое определение термических напряжений; локальный микрорентгеноспектральный анализ; механические испытания при температурах $-196 \dots +100^\circ\text{C}$; измерение электрического сопротивления паяных телескопических образцов; испытания на длительную прочность с автоматической записью деформаций; исследование профиля поверхности на профилографе-профилометре; испытания на герметичность с помощью галоидного течеискателя ГТИ-6; испытания паяных соединений трубопроводов опрессовкой гидравлическим и пневмати-

ским давлением при температуре -196°C , а также испытания в условиях циклического изменения температуры; измерение параметров, характеризующих процессы растекания и заполнения зазоров; металлографический анализ. При аналитическом исследовании термических напряжений использовался машинный счет. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием статистических методов и метода многофакторного эксперимента.

Научная новизна. В работе получены математические зависимости, позволяющие рассчитывать собственные термические напряжения в соединяемых элементах паяного телескопического соединения разнородных металлов. На основании полученных зависимостей проведен анализ влияния свойств соединяемых материалов, геометрических размеров соединения, толщины прослойки и температуры плавления припоя на величину термических напряжений.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что напряженное состояние телескопических соединений разнородных металлов, характеризующееся сжимающими радиальными термическими напряжениями, может быть использовано для повышения таких характеристик работоспособности конструкций, паянных по технологическим покрытиям, как статическая прочность и стойкость к воздействию теплосмен и тепловых ударов.

Практическая ценность. Результаты исследований позволили определить возможность получения работоспособных телескопических соединений алюминий-медь после химического никелирования алюминиевых заготовок, предложить составы флюсов, обеспечивающие высокую активность при пайке особолегкоплавкими висмутовыми припоями в условиях минимального нагрева, и разработать технологический процесс ремонта медно-алюминиевых соединений трубопроводов воздухоразделительных установок.

Апробация работы. По основным разделам работы сделаны доклады: на Белорусской республиканской конференции по сварке, г. Могилев, 1975 г.; на III конференции молодых исследователей ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, 1975 г.; на 10-ом заседании научно-технического семинара "Производство паянных конструкций и стандартизация", ВНИИНМАШ, г. Москва, 1975 г.; на научном семинаре "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977 г.; на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Могилевского машинострои-

тельного института в 1973, 1974 г.г.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 125 страницах машинописного текста, включая введение, пять глав и общие выводы по работе. Содержит 15 таблиц, 52 рисунка и список использованной литературы из 203 наименований.

Глава первая содержит обзор литературы по исследуемому вопросу и постановку цели и задач исследования. Анализ литературных данных показал, что создание неразъемных соединений алюминий-медь связано с целым рядом затруднений, обусловленных различием в физико-химических свойствах и образованием хрупких интерметаллических фаз при совместном нагреве алюминия и меди. Исследования в области сварки разнородных материалов, проведенные К.К. Хреновым, М.Х. Шоршоровым, Д.М. Разкиным, Н.Ф. Казаковым, А.Е. Аснисом, В.И. Виллем и другими исследователями, позволили выявить основные закономерности механизма образования сварного соединения, разработать новые способы сварки и установить оптимальные значения основных параметров режима. В практике получения неразъемных соединений алюминия с медью применяются различные методы сварки давлением (холодная, взрывом, магнитно-импульсная, трением, клинопрессовая, диффузионная и др.), а также электрическая сварка плавлением и пайка. Применение рассмотренных методов сварки для ремонта медно-алюминиевых соединений трубопроводов в монтажных условиях затруднено сложной техникой сварки плавлением, необходимостью использования трубчатых переходников и специализированного сварочного оборудования.

В настоящей работе в качестве базового способа был принят способ пайки легкоплавкими оловянно-свинцовыми и висмутовыми припоями после химического никелирования алюминиевой заготовки в растворе с хлористым никелем. Химическое никелирование позволяет существенно упростить выбор припоев и флюсов и получать стабильные по качеству телескопические медно-алюминиевые соединения в условиях ремонта эксплуатирующегося оборудования.

Неразъемные медно-алюминиевые соединения воздуходелительных установок кроме достаточной механической прочности должны обеспечивать высокую герметичность и стойкость в условиях циклического изменения температуры при удовлетворительной корро-

зионной стойкости. Приводимые в литературе сведения о работоспособности соединений $Al - Ni$ -оловянно-свинцовый припой характеризуют только предел прочности при испытании на срез ($\tau_{ср}^*$) и относятся к соединениям алюминий+алюминий. Процесс пайки телескопического соединения разнородных металлов связан с рядом особенностей, обусловленных возникновением термических напряжений, различной скоростью растворения и возможностью взаимодействия паяемых материалов при переходе их в расплавленный припой, а также различной активностью применяемых флюсов по отношению к каждому из соединяемых материалов и образованием неправильно разомкнутого гальванического элемента. Для определения влияния этих особенностей на процесс пайки и работоспособность соединений необходимо решить следующие задачи: аналитически и экспериментально исследовать собственные термические напряжения в паяных телескопических соединениях разнородных металлов; исследовать влияние термических напряжений на работоспособность конструкций; исследовать взаимодействие конструктивных и технологических материалов при пайке соединений $Al - Ni$ -оловянно-свинцовый припой-медь; разработать составы флюсов, обеспечивающие высокую активность при пайке висмутовыми припоями в условиях минимального нагрева; разработать и внедрить в производство технологию пайки медно-алюминиевых соединений, допускающую возможность применения ее в условиях ремонта эксплуатирующегося оборудования.

Глава вторая посвящена разработке методики проведения экспериментальных исследований. Для экспериментального определения термических напряжений был использован рентгенографический метод. Исследования проведены на дифрактометре ДРОН-0,5, снабженном гониометрическим устройством, счетчиком интенсивности излучения и самопишущим электронным потенциометром. При определении макронапряжений производили сопоставление дифрактограмм, снятых с образующей паяного телескопического соединения алюминий-медь и алюминиевой трубки, свободной от термических напряжений. Обработка дифрактограмм включала разделение α_1 - α_2 -дублета и определение положения центра тяжести α_1 -профиля. Экспериментальное исследование взаимодействия конструктивных и технологических материалов проводилось по стандартным методикам с оценкой результатов по краевому углу смачивания, высоте подъема припоя в вертикальном зазоре и коэффициенту за-

полнения при затекании в горизонтальный зазор. При изучении особенностей растекания припоев по никелированной поверхности проводилась запись профиля образцов на профилографе-профилометре завода "Калибр". Для изучения процессов взаимодействия расплавленного припоя с покрытием и медью проводился локальный микрорентгеноспектральный анализ паяных соединений на анализаторе "Каека", результаты которого представляли собой кривые распределения концентрации Pb , Ni , Cu по сечению образцов.

Для анализа стойкости паяных соединений разнородных металлов в условиях циклического изменения температуры была разработана методика исследования, предусматривающая измерение электрического сопротивления симметричных телескопических образцов и механические испытания. Изменение сопротивления регистрировалось с помощью специальной установки, использующей метод амперметра-вольтметра. Длительная прочность изучалась на специально изготовленной установке, обеспечивающей постоянство приложенной нагрузки и возможность регистратии деформаций телескопических трубчатых образцов при неограниченной длительности испытаний. Параллельно с исследованием стабильности сопротивления проводились испытания герметичности трубчатых медно-алюминиевых образцов в условиях, близких к условиям эксплуатации трубопроводов воздухоразделительных установок. Комплекс испытаний для каждого из образцов предусматривал выдержку под внутренним давлением 7,4 ати при температуре $-196^{\circ}C$ в течение до 500ч, 20-и кратное термоциклирование по схеме $-196 \rightarrow +70^{\circ}C$, пятикратное нагружение давлением до 150 ати в течение 10...15 минут и проверку герметичности при давлении 18 ати с использованием фреона-12 и галоидного течеискателя ГТИ-6.

Глава третья посвящена исследованию собственных термических напряжений в соединяемых элементах телескопических соединений разнородных металлов, полученных капиллярной пайкой. При выводе аналитических зависимостей для расчета термических напряжений были использованы результаты работ Г.А. Николаева и известное из теории упругости решение задачи об осесимметричной деформации трубы. На основании данных Флемингса о вязкости жидкости, кристаллизующейся в узком зазоре, был сделан вывод о возможности применения принципа суперпозиции при учете изменения объема расплавленного припоя в процессе затвердевания и полу-

чены следующие выражения для осевых, окружных и радиальных напряжений:

$$\sigma_{2n} = \frac{E_n[(\alpha_n - \alpha_b)(T - T_{пл}) + \frac{2S\delta}{3D_2}]}{2\mu - \alpha + \beta(\epsilon - 2\mu)} \cdot \frac{\alpha - \beta\epsilon}{1 - \beta}$$

$$\sigma_{tn} = \frac{E_n[(\alpha_n - \alpha_b)(T - T_{пл}) + \frac{2S\delta}{3D_2}]}{2\mu - \alpha + \beta(\epsilon - 2\mu)} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_1}{2r}\right)^2\right]$$

$$\sigma_{rn} = \frac{E_n[(\alpha_n - \alpha_b)(T - T_{пл}) + \frac{2S\delta}{3D_2}]}{2\mu - \alpha + \beta(\epsilon - 2\mu)} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_1}{2r}\right)^2\right]$$

$$\sigma_{2b} = \frac{E_b \cdot \beta \cdot [(\alpha_n - \alpha_b)(T - T_{пл}) + \frac{2S\delta}{3D_2}]}{2\mu - \alpha + \beta(\epsilon - 2\mu)} \cdot \frac{\alpha - \beta\epsilon}{1 - \beta}$$

$$\sigma_{tb} = \frac{E_b \cdot \beta \cdot [(\alpha_n - \alpha_b)(T - T_{пл}) + \frac{2S\delta}{3D_2}]}{2\mu - \alpha + \beta(\epsilon - 2\mu)} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_2}{2r}\right)^2\right]$$

$$\sigma_{rb} = \frac{E_b \cdot \beta \cdot [(\alpha_n - \alpha_b)(T - T_{пл}) + \frac{2S\delta}{3D_2}]}{2\mu - \alpha + \beta(\epsilon - 2\mu)} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_2}{2r}\right)^2\right]$$

где σ_2 , σ_t , σ_r - осевая, окружная и радиальная составляющие, E - модуль упругости, μ - коэффициент Пуассона, α - коэффициент термического расширения (КТР), $T_{пл}$ - температура солидуса припоя, T - температура эксплуатации, S - толщина прослойки припоя, r - расстояние до оси соединения, D_1 и D_2 - наружный и внутренний диаметры труб, D_2 - диаметр по сопрягаемым поверхностям, δ - относительное изменение объема при кристаллизации припоя. Индексы "н" и "в" относятся к охватывающей и охватываемой деталям соответственно. Постоянные α , β , и ϵ определяются из соотношений:

$$\alpha = 1 + \frac{D_1^2}{D_2^2}; \quad \beta = \frac{E_n}{E_b} \cdot \frac{D_1^2 - D_2^2}{D_1^2 - D_2^2}; \quad \epsilon = 1 + \frac{D_1^2}{D_2^2} :$$

Зависимости (I-6) не учитывают различия в КТР соединяемых материалов и припоя, однако экспериментальная проверка показала хорошее совпадение результатов. При величине зазора до 0,1 мм погрешность расчета по формулам (I-2) не превышала 7%.

Выражения (I-6) позволяют оценить влияние теплофизических свойств соединяемых материалов и условий эксплуатации на величину напряжений. Анализ влияния геометрических размеров на напряженное состояние затруднен тем, что телескопическое соединение характеризуется тремя изменяющимися независимо друг от друга параметрами D_1 , D_2 , D_3 . Поэтому были рассчитаны напряжения в охватывающем элементе медно-алюминиевого соединения, паянного S_n при $r = \frac{D_2}{2}$. После расчета массивов на ЭЦВМ "Минск-32" были получены графические зависимости составляющих σ_r , σ_z , σ_t от толщины стенки Δ и диаметра D_2 для соединения трубы со стержнем сплошного сечения и для телескопического соединения труб одинаковой толщины. Анализ зависимостей показал, что радиальные напряжения возрастают с толщиной стенки и уменьшением диаметра. При $\Delta \gg 2$ мм в телескопическом соединении труба-стержень установлено наличие максимума величины σ_r , приходящегося на диаметр 8...10 мм. Осевые и окружные напряжения в соединении труба-стержень быстро возрастают при увеличении D_2 до 20...25 мм, достигая величины порядка 16 кгс/мм^2 , и в дальнейшем изменяются незначительно. Характер зависимости осевых напряжений в трубном соединении аналогичен характеру их изменения в соединении труба-стержень, а общий уровень напряжений при переходе к телескопическому соединению труб значительно снижается. Сложную зависимость от диаметра D_2 имеют σ_t в телескопическом соединении труб. При $\Delta = 4...5$ мм имеется максимум, приходящийся на диаметр 20...25 мм. В соединениях труб большей толщины σ_t монотонно убывает с ростом диаметра, приближаясь к горизонтальной асимптоте $\sigma_t = 10 \text{ кгс/мм}^2$, а при $\Delta \leq 2,5$ мм монотонно возрастают и приближаются к той же асимптоте.

Результаты исследования термических напряжений показали, что даже в соединениях, паянных легкоплавкими припоями, эти напряжения достигают значительной величины и могут оказать заметное влияние на работоспособность конструкций. Степень влияния будет особенно существенной для трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях глубокого охлаждения, когда термические напряжения резко увеличиваются.

Глава четвертая посвящена исследованию условий образования медно-алюминиевого соединения, паянного по технологическому покрытию. При выяснении природы образования покрытия в раство-

ре, содержащем $NiCl_2$, H_3BO_3 и HF , было установлено, что никелирование алюминия является результатом электрохимического процесса, протекающего в две стадии. Первая является своеобразной подготовкой при которой удаляется окисленный поверхностный слой. На второй стадии процесса происходит постепенное увеличение массы образцов, после чего химическое никелирование самопроизвольно прекращается. Результаты экспериментов показали, что процесс протекает стабильно в достаточно широком интервале температур ($10...40^{\circ}C$), причем, с повышением температуры уменьшается его длительность. По результатам исследования процесса растекания была получена графическая зависимость продолжительности никелирования, необходимой для достижения хорошего смачивания, от температуры. Анализ профилограмм поверхности показал, что технологическое покрытие имеет неравномерную толщину, создающую своеобразный микрорельеф, который способствует растеканию припоев. Самопроизвольное растекание припоя по никелированной поверхности, в отличие от растекания по компактному никелю, представляет собой более сложный процесс, который сопровождается образованием характерного ореола вокруг площади, смоченной припоем. На основании литературных данных и полученных в работе профилограмм был сделан вывод о том, что перенос части расплава в область ореола является совокупностью процессов поверхностной диффузии и капиллярного течения припоя, обусловленного микрогеометрией поверхности покрытия. Важным преимуществом принятого метода нанесения покрытия является установленная в работе возможность обеспечения хорошего смачивания малоолеянистыми припоями, более хладостойкими, чем припой на основе олова.

Результаты экспериментов по исследованию заполнения зазоров показали, что в соединениях $Al - Ni$ -припой- Si обеспечиваются более высокие значения коэффициента заполнения и высоты подъема, чем при пайке однородных соединений никелированный алюминий + никелированный алюминий. Высота подъема припоя резко уменьшается по мере увеличения зазора поэтому при ремонте медно-алюминиевых соединений трубопроводов может возникнуть необходимость в ступенчатой пайке с использованием особолегкоплавких висмутовых припоев. Известные флюсы для пайки такими припоями обладают низкой активностью при температурах до $100^{\circ}C$. По методике многофакторного эксперимента была исследована флю-

10.

сущая способность системы $ZnCl_2 - SnCl_2 - HCl - H_2O$, выбранной на основании анализа литературных данных. Результаты исследования позволили разработать состав достаточно активного флюса, представляющего разбавленный раствор $SnCl_2$ (0,4...1,5%) и HCl (5...18%). Практика использования этого флюса показала, что в процессе пайки на капле висмутового припоя и прилегающей к ней области происходит контактное восстановление Sn из раствора, приводящее к повышению температуры плавления припоя и ухудшению смачивания при низкой скорости нагрева. Для обеспечения хорошего качества при пайке сплавов системы $Sn - Pb$ и уменьшения влияния скорости нагрева на заполнение зазоров было предложено ввести в состав флюса хлористые соли металлов, образующих с Sn легкоплавкую эвтектику. На основании этого предложения экспериментально был разработан флюс, содержащий помимо $SnCl_2$ и HCl хлористый кадмий (0,1...0,5%) и хлористый свинец (0,2...0,7%).

Глава пятая посвящена исследованию работоспособности телескопических медно-алюминиевых соединений, паянных по никелевому покрытию. Ввиду недостаточной прочности сцепления покрытия с основой значительное внимание было уделено исследованию прочности соединений. На основании анализа механизма разрушения соединений, паянных после химического никелирования, было сделано предположение о возможности существенного повышения прочности телескопических образцов за счет создания в зоне паяного шва сжимающих радиальных термических напряжений. Экспериментальная проверка показала, что соединения разнородных металлов, напряженное состояние которых характеризуется соотношением $\alpha_k > \alpha_s$, а значит и сжимающими σ_r , обеспечивают более высокие значения τ_{Br} , причем, с увеличением разности $\alpha_k - \alpha_s$ эффект упрочнения проявляется заметнее. Если для телескопического соединения $Al - Al$, паянного Sn , $\tau_{Br}^0 = 1,58$ кгс/мм², то для соединений $Al - Cu$, $Al - Fe$, $Al - Mo$ получены значения 2,76, 3,08 и 3,32 кгс/мм² соответственно. Представленные в табл. I данные также свидетельствуют о соответствии характера изменения τ_{Br}^0 величине и знаку радиальной составляющей σ_r .

Комплексная оценка влияния таких факторов как $T(X_1)$, $T_{пл}(X_2)$ и $S(X_3)$ на величину $\tau_{Br}^0(y)$ медно-алюминиевых соединений, проведенная по методике многофакторного эксперимента позволила получить уравнение, описывающее процесс упрочнения:

$$y = 3,39 - 0,9X_1 + 0,33X_2 - 0,4X_3 + 0,21X_1X_3 \quad (7)$$

Таблица I

При- пой	Материал детали		Величина $\tau_{ср}^A$ (кгс/мм ²) при температу- ре испытания, °С			
	наружн.	внутр.	- 196	0	+20	+ 100
Sn	Al	Cu	5,0	3,17	2,76	1,50
	Al	Al	-	1,48	1,58	1,32
	Cu	Al	-	1,28	1,34	1,24
Cd	Al	Cu	5,61	4,30	4,0	2,55
	Al	Al	-	2,35	2,35	2,17
	Cu	Al	-	1,68	1,97	1,91

Уравнение (7) и приведенные в таблице 2 данные позволяют сделать окончательный вывод, что при наличии сжимающих радиальных напряжений (т.е. при $\alpha_k > \alpha_s$) на границе *Ni* - *Al* возникают силы трения, затрудняющие протекание сдвиговой деформации и повышающие прочность соединений.

Таблица 2

Характеристика соединения	Предел прочности при срезе, кгс/мм ² соединений, паянных		
	ПОС40	Sn	Cd
Нахлесточное соединение <i>Al</i> - <i>Cu</i>	0,913	0,922	0,894
Телескопическое соедине- ние <i>Al</i> - <i>Cu</i> ($\alpha_k > \alpha_s$)	2,48	2,76	4,02
Телескопическое соедине- ние <i>Al</i> - <i>Cu</i> , освобожденное от термических напряжений с помощью разрезов по об- разующей алюминиевой трубки	1,44	1,37	1,49

Длительные испытания образцов на растяжение показали, что при температуре +20°C характер кривой ползучести для соедине-
ний *Al* - *Cu* аналогичен характеру, установленному на образцах

$Cu + Cu$, но значения длительной прочности несколько повышаются. Локальным микрорентгеноспектральным анализом было установлено, что причиной повышения длительной прочности является одновременное растворение паяемых металлов Cu и Ni в расплавленном припое, в результате которого припой насыщается тугоплавкими компонентами, повышающими его крипоустойчивость.

Характер напряженного состояния телескопических соединений, обусловленного различием КТР соединяемых материалов, оказывает значительное влияние на работоспособность в условиях циклического изменения температуры. Результаты экспериментов (табл. 3) показывают, что при $\alpha_n > \alpha_s$ сохраняется неизменной первоначальная величина электрического сопротивления. Это свидетельствует о высокой их стойкости в условиях тепловых ударов. У образцов, напряженное состояние которых характеризуется соотношением $\alpha_n < \alpha_s$, отмечено резкое увеличение сопротивления, что является свидетельством возникновения и развития микротрещин, которые при достаточно большом количестве циклов изменения температуры приводят к практически полному разрушению соединений по месту спая.

Таблица 3.

Материал детали		! Начальное сопротив- ление мком	! Схема цикла °К	! К-во циклов	! Изменение сопротивления мком
наружн.	внутр.				
Al	! Cu	29	! 373 ± 77	! 500	! 0,3
Cu	! Al	59	! 373 ± 77	! 200	! 142
Al	! Fe	143	! 373 ± 77	! 500	! 0,35
Fe	! Al	80	! 373 ± 77	! 80	! 450

Результаты испытаний в 3% - ном растворе $NaCl$ свидетельствуют об удовлетворительной коррозионной стойкости соединений, паянных по никелевому покрытию. Снижение прочности за 2000 час составило 16%, тогда как аналогичные медно-алюминиевые образцы, паянные после абразивного лужения через 200 часов разрушались практически без приложения нагрузки.

О надежной работе трубных соединений $Al - Cu$, паянных после химического никелирования, свидетельствуют и результаты их производственных испытаний, которые показали возможность до-

стижения равнопрочности основному материалу, высокоб герметичность и способность сопротивляться воздействию гидравлических ударов. По результатам производственных испытаний технологический процесс пайки мено-алюминиевых соединений, включающий химическое никелирование в растворе HF , NiCl_2 и H_3BO_3 , признан годным для ремонта воздухоразделительных установок и использован на производстве. Экономический эффект, полученный на Могилевском комбинате синтетического волокна за счет уменьшения степени демонтажа установки "Petro Carpon" и сокращения длительности ее простоя составил 77250 рублей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ :

1. Установлено, что при пайке по технологическим покрытиям разнородных металлов, отличающихся величиной коэффициентов термического расширения, в телескопическом соединении, охватывающий элемент которого изготовлен из материала с более высоким коэффициентом термического расширения, имеет место эффект упрочнения, обусловленный воздействием сжимающих радиальных напряжений.

2. Радиальные напряжения сжатия, действующие в паяном шве телескопического соединения разнородных металлов, в котором материал охватываемого элемента имеет более высокий коэффициент термического расширения, препятствуют возникновению и развитию микротрещин в кристаллизационной зоне соединения при циклическом изменении температуры и обеспечивают надежную работу трубопроводов в условиях теплосмен и тепловых ударов.

3. Предложена методика расчета термических напряжений в паяном телескопическом соединении разнородных материалов, позволяющая учесть толщину прослойки припоя и изменение его объема в процессе кристаллизации. Проведена экспериментальная проверка, которая показала хорошее совпадение опытных данных с расчетными.

4. При пайке соединений никелированный алюминий - медь оловянно-свинцовыми припоями обеспечивается более высокая длительная прочность, чем при пайке соединений медь - медь, что связано с одновременным растворением паяемых разнородных металлов меди и никеля в жидком припое.

5. Обусловленное воздействием термического цикла пайки напряженное состояние паяных телескопических соединений раз-

родных металлов, охватывающий элемент которых изготовлен из материала с более высоким коэффициентом термического расширения, определяется главным образом величиной окружных и осевых напряжений, которые имеют примерно одинаковую величину и возрастают с ростом диаметра соединения и уменьшением толщины его стенки.

6. Установлено, что предварительное химическое никелирование алюминия в растворе с хлористым никелем существенно улучшает условия обеспечения совместимости конструкционных и технологических материалов при пайке медно-алюминиевых соединений.

7. Показано, что никелирование алюминия и его сплавов в водном растворе хлористого никеля, фтористоводородной и борной кислот представляет собой электрохимический процесс и установлен характер зависимости скорости никелирования от температуры.

8. Показано, что разбавленные водные растворы солей и кислот могут быть использованы в качестве паяльных флюсов. Разработаны составы высокоактивных флюсов для пайки особолегкоплавкими припоями на основе висмута при температуре меньше 100°C .

9. Разработан технологический процесс пайки телескопических медно-алюминиевых соединений, допускающий возможность применения его в монтажных условиях.

10. Производственные испытания показали хорошую работоспособность телескопических медно-алюминиевых соединений, паянных по разработанной технологии, в условиях глубокого охлаждения, термоциклирования, гидравлических ударов и воздействия коррозионноактивных сред, что позволило применить их на производстве при ремонте воздухоразделительных установок и получить экономический эффект в размере 77250 руб.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Цумарев Ю.А., Силин И.И., Березиенко В.П. Термические напряжения в телескопических паяных соединениях разнородных металлов. "Автоматическая сварка", 1975, № 3.

2. Березиенко В.П., Цумарев Ю.А., Силин И.И. Исследование электрического сопротивления паяных комбинированных телескопических соединений. В сборнике "Механизация и ав-

томатизация сварочного производства ". г. Могилев, 1975 г.

3. Лашко С.В., Цумарев Ю.А., Червякова Н.В. Анализ напряженного состояния паяных комбинированных телескопических соединений с использованием ЭЦВМ "Минск-32". В сборнике "Механизация и автоматизация сварочного производства ", г. Могилев, 1975 год.

4. Березиенко В.П., Цумарев Ю.А., Силин И.И., Пономаренко Н.И. Пайка медно-алюминиевых соединений. "Промышленность Белоруссии ", 1976, № 1.

5. Лашко С.В., Березиенко В.П., Цумарев Ю.А. Работоспособность паяных телескопических медно-алюминиевых соединений. "Сварочное производство ", 1976, № 4.

6. Березиенко В.П., Цумарев Ю.А., Силин И.И., Кроловещкий В.И., Дмитриев А.Б. Флюс для низкотемпературной пайки меди. Авторское свидетельство СССР, 1976 г., № 483219.

7. Лашко С.В., Березиенко В.П., Цумарев Ю.А. Флюс для низкотемпературной пайки. Авторское свидетельство СССР № 539719, 1977 год.

Соискатель



Ю.А. Цумарев.

16.

