

Введение Одним из путей экономии материалов является изготовление установок, машин и механизмов комбинированными. Такое изготовление вполне возможно, так как во многих случаях в условиях, требующих специальных сталей и сплавов, работает не вся конструкция, а лишь отдельные ее узлы или детали. Остальная часть конструкции находится в обычных условиях [1]. В комбинированной конструкции необходимо соединять между собой отдельные ее части. Для работы в агрессивной среде или в условиях высокой температуры это соединение целесообразно выполнять при помощи сварки. Однако при этом необходимо сваривать между собой стали и сплавы, существенно отличающиеся друг от друга своими физико-химическими свойствами, в связи с чем довольно трудно получить качественное и надежно работающее в особых условиях сварное соединение [3]. Одной из широко применяемых комбинаций разнородных материалов, объединяемых в одно целое является соединение меди и алюминия сваркой в твердо-жидком состоянии (рис. 1). Рис. 1 – Телескопическое сварное соединение Cu-Al трубок Первая и основная трудность сварки Al – Cu обусловлена тем, что в зоне их сплавления может происходить изменение структуры с образованием эвтектического композиционного сплава, существенно отличающегося от структуры сплавляемых металлов сплавов (рис. 2). Изменение структуры сплавляемых материалов может быть настолько сильным, что существенно снизятся их прочностные и пластические характеристики. В результате возможно преждевременное (аварийное) разрушение весьма ответственной конструкции. Рис. 2 – Эвтектический композиционный сплав полученный сваркой Al-Cu Вторая трудность сварки разнородных металлов и сплавов, в данном случае Al – Cu, заключается в том, что в процессе изготовления сварного соединения или при его эксплуатации в шве часто образуются трещины, которые проходят по его середине или у границы сплавления (рис. 3) [4]. Рис. 3 – Разрушение сварного соединения по границе вторичной фазы с медной трубой (x70) Экспериментальная часть Для идентификации поэлементного состава металла участков поверхности сплавления, отобраны образцы алюминиевой трубки и литейного грата, выдавливаемого продольным усилием (от давления 0,2 МПа) при температуре до 700 оС контактно стыковой сварки сопротивлением труб. Анализ состава проведён оптико-эмиссионным методом на оборудовании с привлечением программных средств фирмы «ARL-3460». Результаты анализа приведены в таблице 1. Таблица 1 – Идентификация химического состава металла трубы вторичной фазы Образец, ГОСТ Al Cu Si Fe % Al труба 99,58 0,01 0,14 0,24 АД0 по ГОСТ 4784 $\geq 99,5$ - - - Грат Основа 23 0,1 0,3 Образец, ГОСТ Zn Mg Mn Ti Ni % Al труба 0,01 0,005 0,01 0,01 - АД0 по ГОСТ 4784 - - - Грат 0,1 0,02 0,01 0,01 0,01 Из сопоставления данных следует, что металл трубы имеет химический состав, соответствующий требованиям ГОСТ 4784-97 к маркам АД00 и АД0 (1011) [2]. Состав металла грата, содержит ~ 23% Cu. В процессе сварки Cu диффундирует

в металл Al трубки, образуя промежуточный эвтектический композиционный слой (ЭКС) состава $\alpha' + (\alpha' + \theta) + \text{min}\theta$. Он стоит из пересыщенного твёрдого раствора алюминия (α') и эвтектики ($\alpha' + \theta$). Последняя содержит α' -раствор и промежуточную фазу θ (состава 54,1% Cu [3]) - интерметаллическое соединение (CuAl_2). Из приближённого анализа объёмное соотношение фаз составляет: доля твёрдого раствора (α') ~ 57%, интерметаллического соединения (CuAl_2) ~ 43%. Рис. 4 иллюстрирует результаты измерений микротвёрдости по периметру вздутий алюминиевых труб. В этом случае очаги вздутия расположены: на утонённом, от раздачи участке алюминиевой трубы у границы раздела медь - эвтектический композиционный слой и на участке повышенной концентрации напряжений, по линии соединения торец грата - медь. Рис. 4 - Измерение микротвёрдости по периметру вздутий алюминиевой трубы (x75) Таким образом, вздутия в алюминии образуются над локальными зонами не сплошного эвтектического композиционного слоя, на тонкостенных участках, у границ раздела медь - эвтектический композиционный слой. Разрушение сварного соединения (развитие трещин) наиболее вероятно вдоль более слабой поверхности сплавления медь - эвтектический композиционный слой. Измерениями и анализом микротвёрдости участков сварного соединения выявлены уровни твёрдости эвтектического композиционного слоя, составляющие интервал значений H100170...233, что ~ в 7 раз превышает значения твёрдости алюминиевой матрицы H10025...31, и уровень твёрдости меди H10056...94. Твёрдость грата составила величину H100180. Это свидетельствует об очень высокой хрупкости эвтектического композиционного слоя, говорит об его высоком модуле упругости и существенно более низком, по сравнению с матрицами меди и алюминия, коэффициенте температурного расширения. При работе такого сэндвича в условиях теплосмен по - видимому возникают большие внутренние напряжения, которые могут привести к образованию трещин и расслоению металла вдоль поверхности сплавления сварного соединения. Измерениями так же выявлены аномальные уровни микротвёрдости эвтектического композиционного слоя на цилиндрических участках сварного соединения H100210...233. Это объясняется более продолжительным взаимодействием меди с алюминием при сварке в результате чего образуется больше чем в грате CuAl_2 и меньше твёрдого раствора α' . Измерением микротвёрдости периметров вздутий алюминиевых труб установлено увеличение твёрдости Al матрицы к зениту вздутий до значений H10033...43, что обусловлено деформационным старением (от наклёпа при вздутии). Результаты исследований и их обсуждение с образованием промежуточного эвтектического композиционного слоя в медь - алюминиевых сварных соединениях формируются две поверхности сплавления: одна - с алюминиевой трубкой, является результатом сварки плавлением, вторая - с медной трубкой представляет собой результат твёрдофазного процесса диффузионной сварки ,

характеризуется меньшей степенью сродства свойств эвтектического композиционного слоя с медью, и более низкой степенью адгезии и когезии. Кроме того, при наличии дефектов не сплошных участков эвтектического композиционного слоя образуются поверхности третьего вида пайки меди с алюминием и представляют наиболее слабое, проблемное звено сварного соединения. Вот почему, разрушения и расслоения наиболее вероятны по поверхности линии сплавления меди с эвтектическим композиционным слоем, или поверхности паяного соединения меди с алюминием. Наличие в сварном соединении промежуточного композиционного слоя предохраняет свариваемые металлы от их непосредственного опасного контакта, не допуская, в эксплуатации, электрохимического процесса коррозии и блокирует процессы образования и развития трещиноподобных дефектов, являясь своего рода интерцептором. Однако, при увеличении концентрации напряжений, на поверхности диффузионной сварки, в двух направлениях: от торца алюминиевых трубок (поверхности сплавления грата с медью) и от торца медной трубки, конструктивного не провара, упирающегося в массивный эвтектический композиционный слой, при теплосменах, могут возникать условия, достаточные, для образования трещин и отслоений металла в сварном соединении. Кроме того фрагменты не сплошного эвтектического слоя сварного соединения провоцируют деградацию металла в непосредственном контакте (паяном соединении) меди с алюминием (где протекает процесс резкого увеличения давления), являющийся причиной отслоения и «вздутия» алюминия на тонкостенных участках труб. Таким образом, при контактной сварке сопротивлением на поверхности телескопического соединения медных и алюминиевых трубок, сваренных в твёрдо – жидком состоянии, образуется промежуточный слой структурного состава $\alpha' + (\alpha' + \text{CuAl}_2) + \text{min}\theta\text{II}$. Он предохраняет свариваемые металлы от их непосредственного опасного контакта и обеспечивает необходимые свойства конструкционной прочности. Однако несплошности эвтектического промежуточного слоя вызывают резкое увеличение концентрации напряжений на участках диффузионной сварки меди с эвтектическим композиционным слоем и поверхности пайки меди с алюминием, приводят к образованию разрывов и трещин, провоцируют отслоение и выпучивание алюминиевой трубки в эксплуатации