

Ф. И. Муратаев, А. В. Горбунов, И. А. Абдуллин,
М. А. Клабуков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО СПЛАВА ПРИ СВАРКЕ В ТВЁРДО – ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: эвтектический композиционный сплав, интерметаллическое соединение.

Рассматриваются закономерности формирования структуры и свойств эвтектического композиционного сплава, включающего в себя интерметаллическое соединение $CuAl_2$, при сварке в твёрдо – жидком состоянии. Установлено, что при этом образуются две поверхности сплавления с фрагментами паяного соединения. Участки несплошности ЭКС в эксплуатации становятся очагами образования отслоений и трещин, которые приводят к разгерметизации сварных соединений по поверхности диффузионной сварки и пайки.

Keywords: eutectic composite alloy, intermetallic compound.

The regularities of the formation of structure and properties of the eutectic alloy composition comprising an intermetallic compound $CuAl_2$, when welding in the solid - liquid. Found that when two surfaces are formed from the fusion of fragments of the solder joint. Former land discontinuity in operation become the centers of education and delamination cracks that lead to seal failure of welded joints on the surface diffusion welding and soldering.

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).

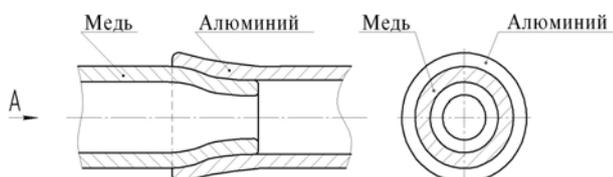


Рис. 1 – Телескопическое сварное соединение Cu-Al трубок

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 ха-

рактеристики. 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 °С контактно стыковой сварки сопротивлением труб. Анализ состава проведён опико-эмиссионным методом на оборудов-

довании 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	≥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 $\alpha' + (\alpha' + \theta) + \text{min}\theta_{\text{II}}$. 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 компо-

зиционный слой. Измерениями и анализом микротвёрдости участков сварного соединения выявлены уровни твёрдости эвтектического композиционного слоя, составляющие интервал значений $H_{100} 170 \dots 233$, что ~ в 7 раз превышает значения твёрдости алюминиевой матрицы $H_{100} 25 \dots 31$, и уровень твёрдости меди $H_{100} 56 \dots 94$. Твёрдость грата составила величину $H_{100} 180$.

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 $H_{100} 210 \dots 233$. 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 zenиту вздутий до значений $H_{100} 33 \dots 43$, 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 эвтектиче-

ский 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.

Заключение

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.

Литература

1. Конструкции из алюминиевых сплавов. Михайлов Г.Г., Бобровников А.П., Красильникова Л.В. – М.: Металлургия, 1983. 239с.
2. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Б.Н. Арзамасов, И.И.Сидорин, Г.Ф.Косолапов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1986. 384 с.
3. Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.В.Люшинский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 208с.
4. Сварка специальных сталей и сплавов: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 272с.

© **Ф. И. Муратаев** – к.т.н., доц. каф. материаловедения, сварки и структурообразующих технологий КНИТУ им. А.Н. Туполева - КАИ, muratashka@mail.ru; **А. В. Горбунов** – асп. той же, andrepoint@mail.ru; **И. А. Абдуллин** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. химии и технологии гетерогенных систем КНИТУ, ilnur@kstu.ru; **М. А. Клабуков** – инж. каф. материаловедения, сварки и структурообразующих технологий КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ, klmisha3007@yandex.ru.