

UDC 620.186

## Consistency of Interlayer Formation in Welded Bimetal Copper-Aluminum

<sup>1</sup> Farid I. Murataev<sup>2</sup> Aleksei V. Gorbunov

<sup>1</sup> Kazan National Research Technical University after A.N.Tupolev-KAI, Russia  
10, Carl Marks street, Kazan, 420111

PhD (technical)

E-mail: muratashka@mail.ru.

<sup>2</sup> Kazan National Research Technical University after A.N.Tupolev-KAI, Russia  
10, Carl Marks street, Kazan, 420111

PhD student

E-mail: andrepoint@mail.ru

**Abstract.** The article considers telescopic joints of copper-aluminum pipes, when interlayer forms on weld lines, which is a eutectic composite alloy, including intermetallic compound  $\text{CuAl}_2$ .

**Keywords:** structure; dissimilar materials; copper; aluminum; intermetallic compound  $\text{CuAl}_2$ .

**Введение.** Одним из путей экономии материалов является изготовление установок, машин и механизмов комбинированными [1].

Для работы в агрессивной среде или в условиях высокой температуры 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 [2]. Одной из широко применяемых комбинаций разнородных материалов, объединяемых в одно целое является соединение меди и алюминия (Рис. 1 а), сваркой в твердо-жидком состоянии.

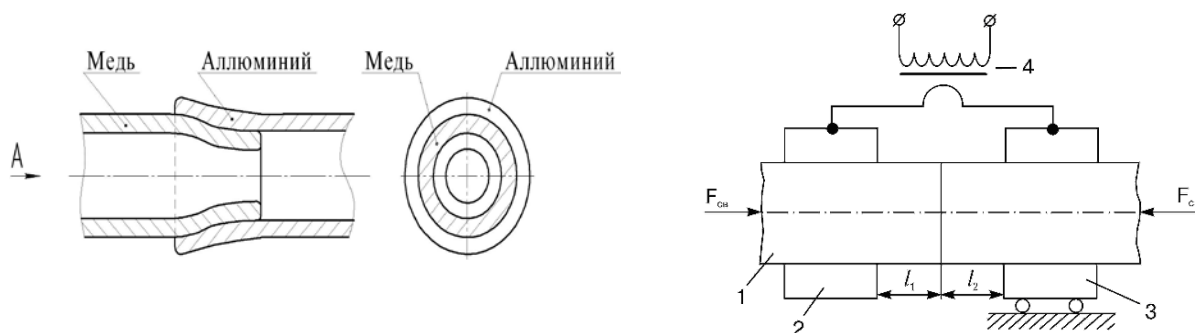


Рис. 1. а – телескопическое сварное соединение Cu-Al трубок, б - схема контактной стыковой сварки: 1 – свариваемые детали; 2 – неподвижный зажим; 3 – подвижный зажим; 4 – сварочный трансформатор;  $F_{сж}$  – сжимающее усилие;  $l_1$  и  $l_2$  – нагреваемые вылеты деталей

При контактно стыковой сваркой сопротивлением (в твердо – жидком состоянии) детали соединяются в процессе совместной пластической деформации нагретых электрическим током торцов деталей при осадке по всей площади сечения. Детали 1 (Рис. 1 б) устанавливаются в токоподводящих зажимах 2 и 3, один из которых, например, зажим 3 подвижный и соединен с приводом усилия сжатия машины. Сварка состоит из двух этапов – нагрева торцов деталей и их осадки.

Первая и основная трудность сварки Al – Cu обусловлена тем, что в зоне их сплавления может происходить изменение структуры с образованием эвтектического композиционного слоя, 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.



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].

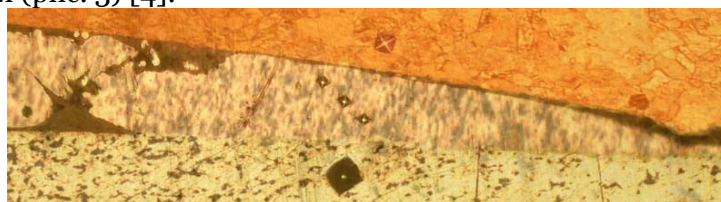
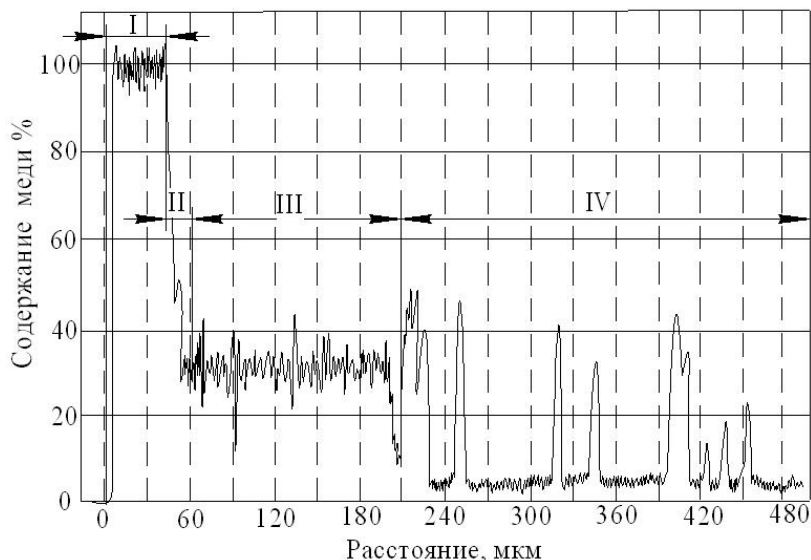


Рис. 3. Разрушение сварного соединения по границе вторичной фазы с медной трубкой (x70)

**Материалы и методы.** Для идентификации поэлементного состава металла участков поверхности сплавления, отобраны образцы алюминиевой трубки и литейного грата.

Анализ состава проведён оптико-эмиссионным методом, металл трубы имеет химический состав, соответствующий требованиям ГОСТ 4784-97 к маркам АДоо и АДо (1011) [3]. Состав металла грата, содержит ~ 23 % меди. В процессе сварки медь диффундирует в металл алюминиевой трубки, образуя промежуточный эвтектический композиционный слой состава  $\alpha' + (\alpha' + \theta) + \text{min}\theta_{II}$ . Он состоит из пересыщенного твёрдого раствора алюминия ( $\alpha'$ ) и эвтектики ( $\alpha' + \theta$ ). Последняя содержит  $\alpha'$ -раствор и промежуточную фазу  $\theta$  (состава 54,1% Cu [3]) - интерметаллическое соединение ( $\text{CuAl}_2$ ). Из приближённого анализа объёмное соотношение фаз составляет: доля твёрдого раствора ( $\alpha'$ ) ~ 57 %, интерметаллического соединения ( $\text{CuAl}_2$ ) ~ 43 %.

С целью определения количества меди и определения фазового состава каждого структурного участка проводился рентгеноспектральный анализ. На рис. 4 представлены результаты записи изменений содержания меди перпендикулярно к оси шва.



*Рис. 4-1.* Характер распределения меди поперек оси шва по направлению от меди к алюминию: I – медь; II – интерметаллид; III – эвтектика; IV – эвтектика и твердый раствор меди в алюминии

Рис. 5 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 торцев грата – медь.



*Рис. 4-2.* 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  $H_{100}170...233$ , что ~ в 7 раз превышает значения твёрдости алюминиевой матрицы  $H_{100}25...31$ , и уровень твёрдости меди  $H_{100}56...94$ . 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 слой на цилиндрических участках сварного соединения  $H_{100}210...233$ . Это

объясняется более продолжительным взаимодействием меди с алюминием при сварке в результате чего образуется больше чем в грате  $\text{CuAl}_2$  и меньше твёрдого раствора  $\alpha'$ . Измерением микротвёрдости периметров вздутий алюминиевых труб установлено увеличение твёрдости Al матрицы к zenиту вздутий до значений  $H_{100}33...43$ , что обусловлено деформационным старением (от наклёпа при вздутии) (Рис. 5).

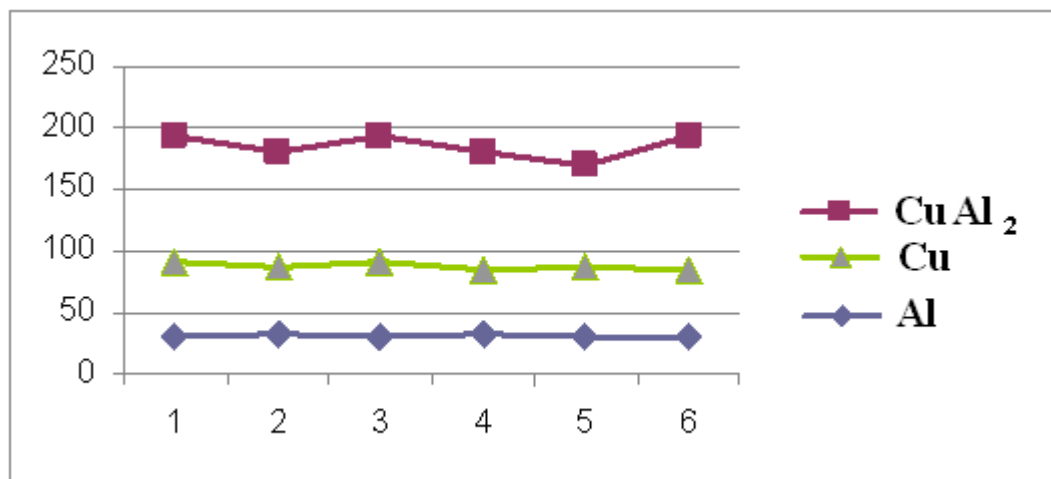


Рис. 5. Измерения микротвёрдости сварного соединения медь – алюминий.

**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.

**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.

**Примечания:**

1. Конструкции из алюминиевых сплавов. Михайлов Г.Г., Бобровников А.П., Красильникова Л.В. М.: Металлургия, 1983. 239 с.
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. 208 с.
4. Сварка специальных сталей и сплавов: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2012. 272 с.

УДК 620.186

**Закономерности формирования структуры и свойств прослойки  
в свариваемом биметалле медь – алюминий**

<sup>1</sup> Фарид Исхакович Муратаев  
<sup>2</sup> Алексей Владимирович Горбунов

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский  
технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия  
420000, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: muratashka@mail.ru.

<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский  
технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия  
420000, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
аспирант  
E-mail: andrepoint@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается телескопическое соединение медь - алюминиевых трубок, когда вдоль линии сплавления образуется промежуточный слой, представляющий собой эвтектический композиционный сплав, включающий интерметаллическое соединение  $\text{CuAl}_2$ .

**Ключевые слова:** структура; разнородные материалы; медь; алюминий; интерметаллическое соединение  $\text{CuAl}_2$ .