

**STUDY OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELD ZONE
OF TELESCOPIC COPPER-ALUMINUM COMPOUNDS**

Farid I. Murataev, Aleksei V. Gorbunov

Kazan national research university named after A.N.Tupolev – KAI, 420111, Kazan,
Russian Federation,

E-mail: andrepoint@mail.ru

Abstract

The regularities of structure formation and properties of the Cu-Al tubes compounds, welded to the solid - liquid state, where along the line formed by fusion of the intermediate layer, which is a eutectic alloy of a composition comprising an intermetallic compound CuAl_2 are being considered

Key words: *Welding of dissimilar steels in the solid - liquid state, an intermediate layer of eutectic composition, intermetallic, fusion of the two surfaces and the surface of solder.*

При эксплуатации систем охлаждения, имеющих телескопические соединения медь – алюминиевых трубок, сваренных, контактно стыковой сваркой сопротивлением (в твёрдо – жидком состоянии) возникают дефекты, приводящие к их разгерметизации.

Макроскопическим анализом сварных соединений установлены закономерности их повреждения, обусловленные металлургической и эксплуатационной наследственностью, что позволило выявить: выдавливание продуктов деградации с торца алюминиевой трубы; несоосность алюминиевых и медных труб в телескопическом сварном соединении. Fig.1. (а, в) иллюстрирует: отслоение металла по поверхности сплавления сварного соединения; образование грат на поверхности медной трубки с отслоением металла сварного соединения (Fig.1. б, в); деформации -вздутие алюминиевой трубки,

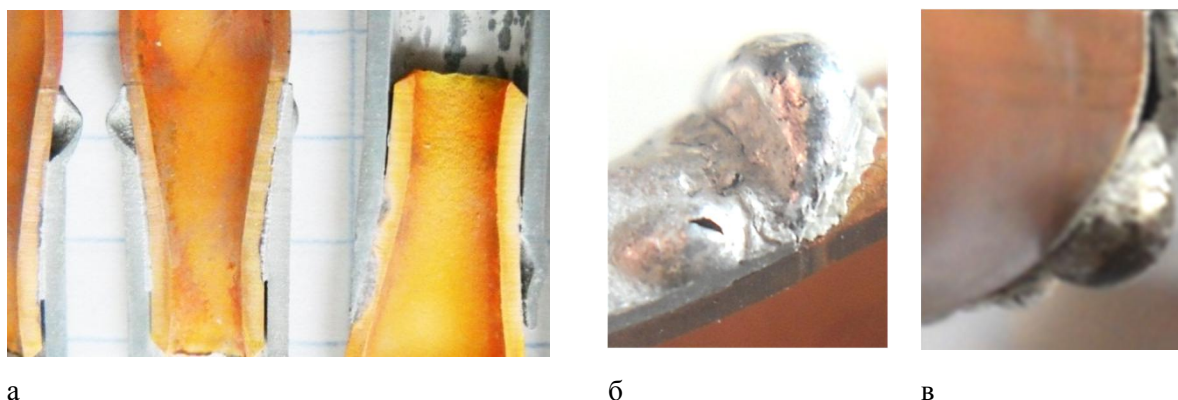


Fig. 1. Типовые повреждения алюминиевых трубок телескопических сварных соединений медь-алюминий

на тонкостенных участках (Fig.1. а, б); её «вздутие» от поверхности конуса телескопического соединения «труба в трубе», со сквозным разрывом и отверстиями (Fig.1. б). Это свидетельствует о возможном резком локальном увеличении давления в связи с ионно-молекулярным превращением водорода в порах металла или на границах раздела матрица-медь–промежуточный слой; очаги язвенной коррозии на внутренней поверхности алюминиевой трубки (Fig.1. а).

Таким образом, очагами деградации металла, на тонком участке развальцованной алюминиевой трубы и в зоне конструктивного неспяра у торца медной трубки, вызывающего эффект концентрации напряжений, могут послужить фрагменты не сплошного промежуточного слоя вдоль поверхности сплавления телескопического сварного соединения.

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 оптико-эмиссионным методом на оборудовании с привлечением программных средств фирмы «ARL-3460».

Результаты анализа приведены в table. Из сопоставления данных следует, металл трубы имеет химический состав, соответствующий требованиям ГОСТ 4784-97 к маркам АД00 и АД0 (1011). Состав металла грата, содержит ~23% меди. Из этого следует, что в процессе сварки медь диффундирует в металл алюминиевой трубки, образуя промежуточный эвтектический композиционный слой состава $\alpha' + (\alpha' + \theta) + \text{min} \theta_{II}$. Он стоит из пересыщенного твёрдого раствора алюминия (α') и эвтектики ($\alpha' + \theta$). Последняя содержит α' - раствор и промежуточную фазу θ (состава 54,1% Cu)-интерметаллическое соединение (CuAl_2). Из приближённого анализа объёмное соотношение фаз составляет: доля твёрдого раствора (α')~57%, интерметаллического соединения (CuAl_2)~43%.

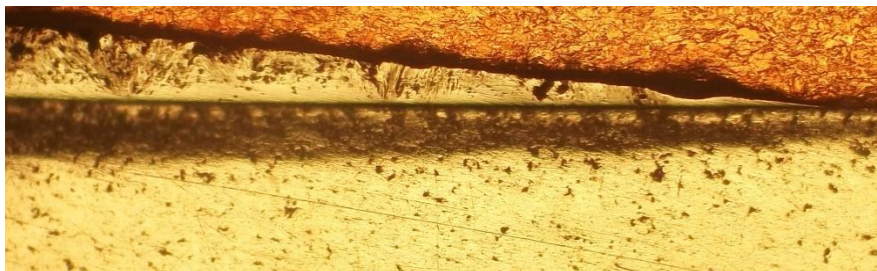
Table. Идентификация химического состава металла трубы вторичной фазы

Образец, ГОСТ	Al %	Cu	Si	Fe	Zn	Mg	Mn	Ti	Ni
Алюминиевая труба	99,58	0,01	0,14	0,24	0,01	0,005	0,01	0,01	-
АД0 по ГОСТ 4784	≥99,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Грат	Основа	23	0,1	0,3	0,1	0,02	0,01	0,01	0,01

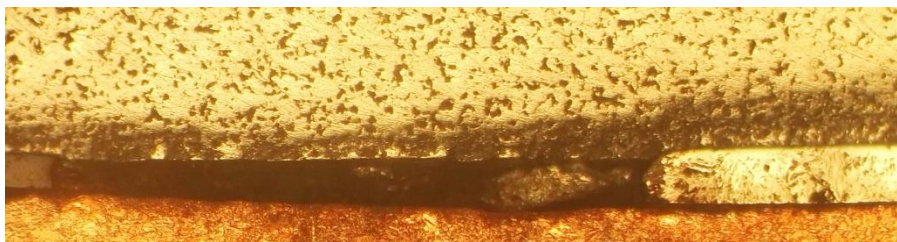
Микроструктурный анализ позволяет выявить варианты характера эксплуатационных повреждений медь-алюминиевых сварных соединений (Fig. 2...в), структурный состав участков поверхностей сплавления и результаты измерений микротвёрдости металла этих участков.



а



б



в

Fig.2. Разрушение сварного соединения по вторичной фазе (а - $\times 100$), по границе вторичной фазы с медной трубкой (по диффузионной сварке б – $\times 70$) и на участке несплошности вторичной фазы (в паяном соединении а – $\times 40$)

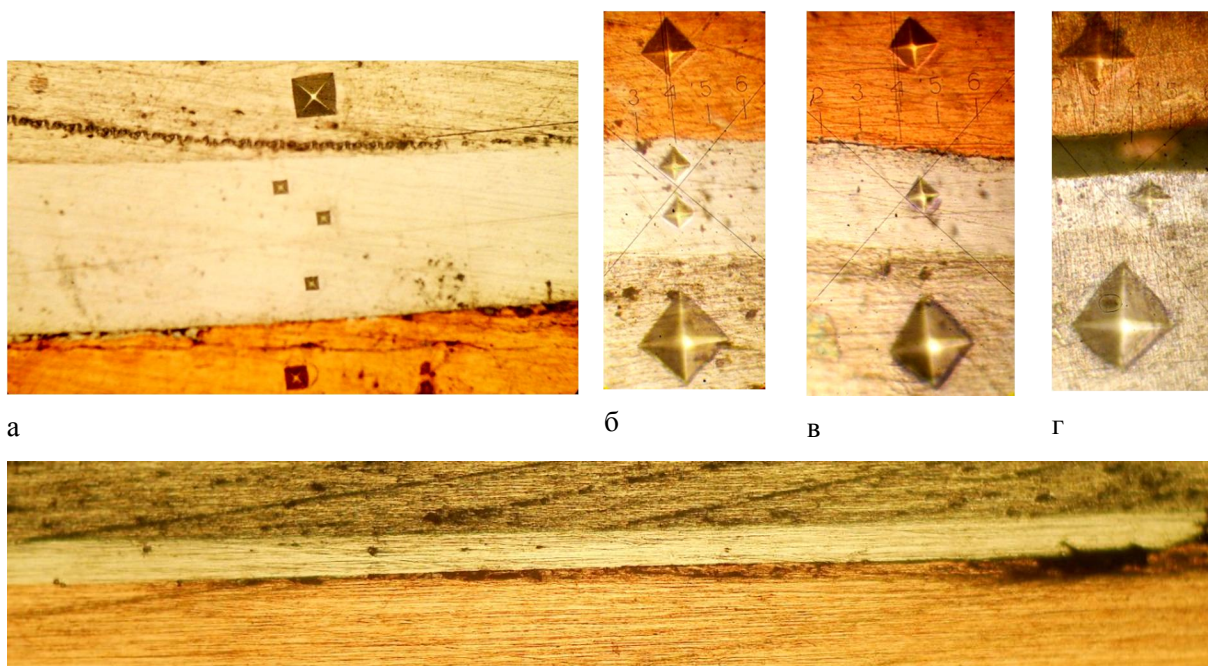
Разрушения сварного соединения по эвтектическому композиционному слою и вдоль границы эвтектики с медной трубкой представлены на fig.2. Микроструктура сварного соединения, отработавшего без дефектов 1,5 года, приведена на fig.3. (б, д) характеризуется соответственно отсутствием или блокированием трещины по линии сплавления эвтектического композиционного слоя с медной трубкой. Очаг разрушения микронепровар на границе раздела 3-х фаз медных и алюминиевых трубок с эвтектическим композиционным слоем. Там же, показаны стадии зарождения fig.3. (а) и развития (в, г), трещин по поверхности сплавления медь – эвтектический композиционный слой иных сварных соединений. Fig. 4. иллюстрирует кинетику трещин (варианты траектории их развития): из линии сплавления меди с эвтектическим композиционным слоем в эвтектический слой (а - $\times 100$), по линии сплавления в основной металл (б - $\times 200$), в основной металл через эвтектический композиционный слой (в- $\times 125$) и непосредственно в основной металл (г). Очаги разрушения на участках повышенной концентрации напряжений: по линии соединения торец грата – медь (fig.4а, в) и по непровару (fig.4.б), образованным при кристаллизации эвтектического композиционного слоя. Там же, (fig.4г) виден фрагмент вздутия на границе раздела алюминиевой матрицы – эвтектический композиционный слой – медь (включение с микротрещиной между трещиной по линии сплавления и основанием вздутия). На fig.5 видны разрушения сварных соединений по

эвтектическому слою и линии сплавления меди с эвтектическим композиционным слоем (а, б, в), трещины по поверхности сплавления медь – эвтектический композиционный слой (г, д, е). Там же, (fig.5a) на утонённом от раздачи участке трубы, виден фрагмент вздутия с началом у границы раздела алюминиевой матрицы – эвтектический композиционный слой.

Fig.6 иллюстрирует результаты измерений микротвёрдости по периметру вздутий алюминиевых труб. В этом случае очаги вздутия расположены: на утонённом, от раздачи участке алюминиевой трубы (fig.6a) у границы раздела медь – эвтектический композиционный слой и на участке повышенной концентрации напряжений, по линии соединения торец грата – медь.

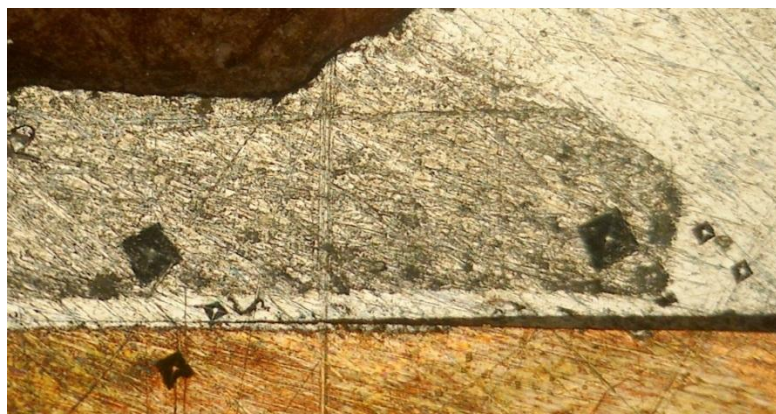
Таким образом, вздутия в алюминии образуются над локальными зонами не сплошного эвтектического композиционного слоя (fig.4...6), на тонкостенных участках, у границ раздела медь – эвтектический композиционный слой. Разрушение сварного соединения (развитие трещин) наиболее вероятно вдоль более слабой поверхности 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 $\sim$ в 7 раз превышает значения твёрдости Al матрицы $H_{100}25...31$, и уровень твёрдости меди $H_{100}56...94$. Твёрдость грата составила величину $H_{100}180$.

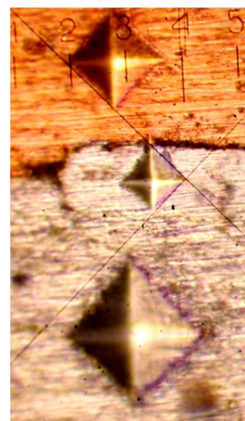


д

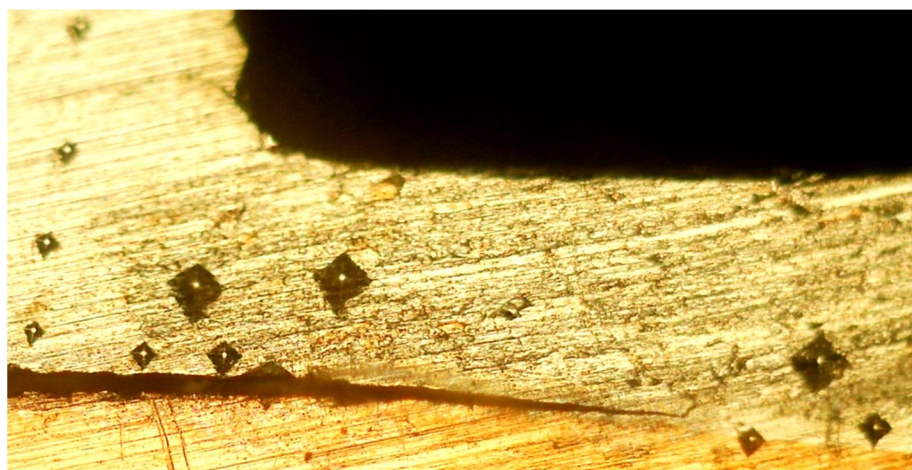
Fig.3. Стадии зарождения (а) и развития (в, г), развития и блокирования трещин (д, б);
(а - $\times 150$), (б - $\times 270$), (в - $\times 250$), (г - $\times 350$) и (д - $\times 100$)



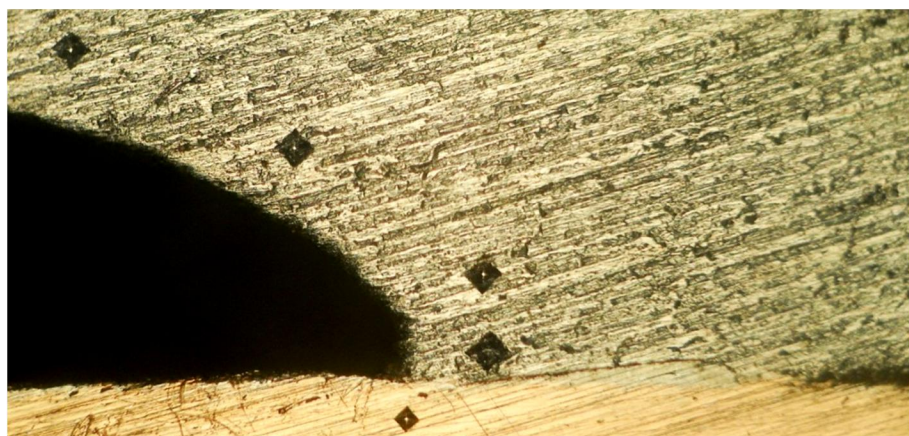
а



б

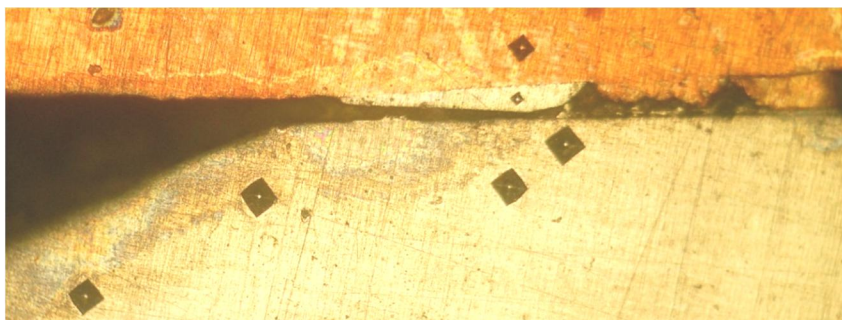


в



г

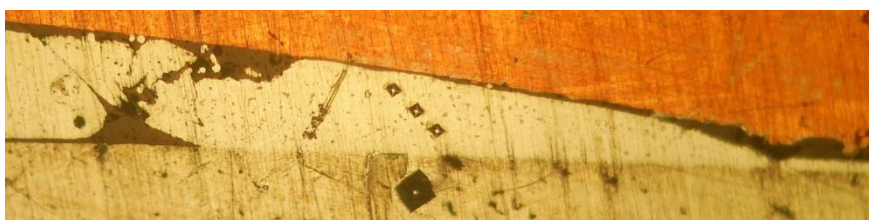
Fig.4. Кинетика трещин из линии сплавления (медь с алюминием) во вторичную фазу (а, x100), по линии сплавления в основной металл (б, x200), в основной металл через вторичную фазу (в- x125) и непосредственно в основной металл (г- x65)



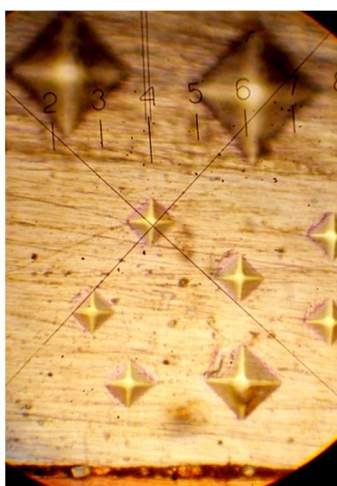
а



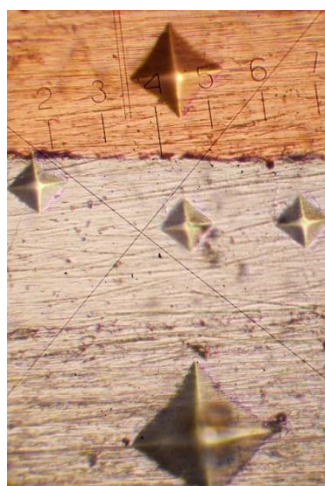
б



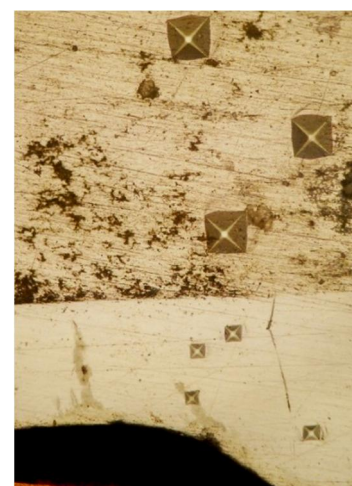
в



г



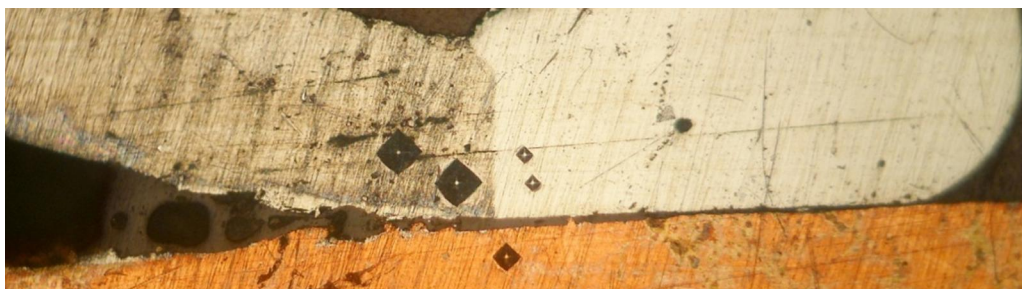
д



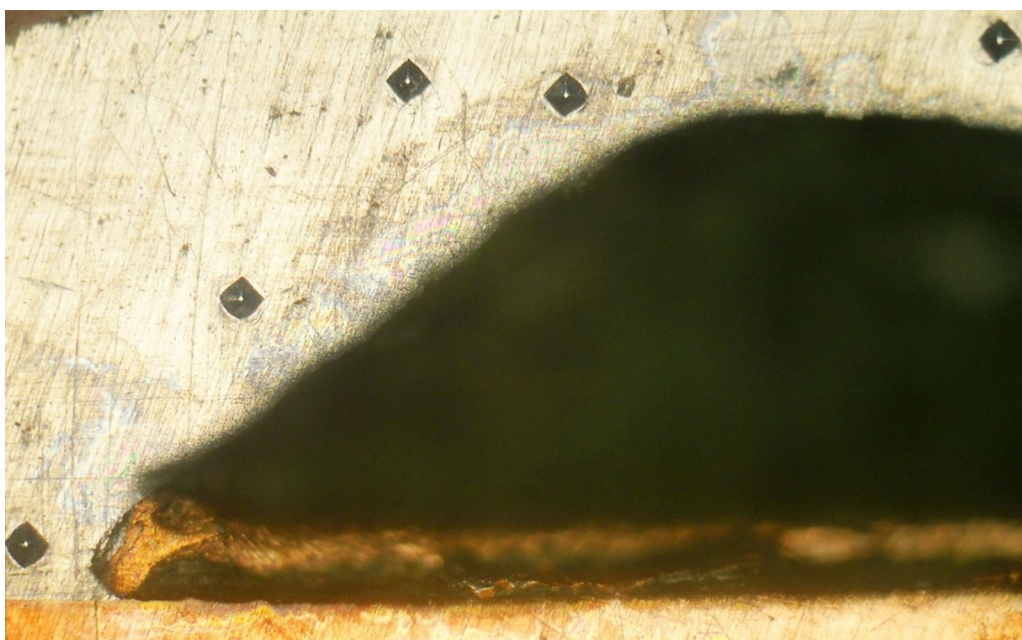
е

Fig.5. Повреждения сварных соединений по вторичной фазе и линии сплавления с медной трубкой (а - x75, б- x125, в- x80, г, д- x200, е- x80)

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.



а



б

Fig.6. Измерение микротвёрдости по периметру вздутий алюминиевой трубы (а, х75, б- х65)

Измерениями так же выявлены аномальные уровни микротвёрдости эвтектического композиционного слоя 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 $CuAl_2$ и меньше твёрдого раствора α' . Измерением микротвёрдости периметров вздутий алюминиевых труб установлено увеличение твёрдости алюминиевой матрицы к зениту вздутий до значений $H_{100}33...43$, что обусловлено деформационным старением (от наклёпа при вздутии).

ВЫВОДЫ

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 диффузионной сварки (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.

При контактной сварке сопротивлением на поверхности телескопического соединения медных и алюминиевых трубок, сваренных в твёрдо – жидком состоянии, образуется промежуточный слой структурного состава $\alpha' + (\alpha' + \text{CuAl}_2) + \min \theta_{II}$. 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.

REFERENCES

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. Муратаев Ф.И., Горбунов А.В. «Исследование деградации металла сварных соединений медных и алюминиевых труб» Материалы VI международной научно-технической конференции Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011» Казань. стр. 71-77.