



УДК 621.791.3

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОГО МЕДНОГО СПЛАВА

С. В. МАКСИМОВА, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины В. Ф. ХОРУНОВ, В. А. ШОНИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты исследования комплекса свойств паяных соединений медного сплава, упрочненного дисперсными частицами  $Al_2O_3$ , полученных с помощью вакуумной пайки и адгезионно-активных припоев. Показано, что применение термической обработки основного металла в сочетании с припоем системы Cu–Ti обеспечивает прочность паяных соединений на разрыв на уровне 81 % прочности основного металла в состоянии поставки и 92 % после предварительной термической обработки.

*Ключевые слова:* вакуумная пайка, дисперсно-упрочненный медный сплав, стыковое паяное соединение, адгезионно-активные припои, механические свойства на растяжение

Соединения, полученные с помощью высокотемпературной пайки, являются гетерогенными системами, состоящими из различных материалов, которые характеризуются разными физико-механическими свойствами. Прочность паяных соединений в значительной мере зависит от правильного выбора состава припоя, его механических свойств и совместимости с паяемым материалом. Технологический процесс пайки позволяет избежать высоких остаточных напряжений в соединениях, расплавления основного металла, образования трещин и, таким образом, сохранить механические свойства основного металла и не нарушить его структурное состояние. В процессе пайки происходит физико-химическое взаимодействие основного металла с расплавленным припоем, что влияет на состав паяного шва. При этом механические свойства паяных соединений отличаются от свойств припоя в исходном состоянии [1] и находятся в прямой зависимости от структурного состояния металла шва и его ширины [2].

В настоящей работе представлены результаты исследования механических свойств паяных соединений дисперсно-упрочненного медного сплава (Glidcop Al-25), полученных с помощью адгезионно-активных припоев на основе систем Cu–Ti, Cu–Mn–Ni–Fe–Si и др. (табл. 1). Микроструктурные особенности паяных соединений жаропрочного медного сплава Glidcop Al-25, упрочненного дисперсными оксидными частицами  $Al_2O_3$ , ранее были изучены при использовании различных припоев и методов нагрева [3, 4].

Для исследования механических свойств основного материала и паяных соединений использовали дисперсно-упрочненный медный сплав

Glidcop Al-25 в состоянии поставки и после отжига при температуре 950 °С в течение 1 ч. При изготовлении стыковых паяных соединений использовали цилиндрические заготовки длиной около 70 мм с подготовленными торцевыми поверхностями. Для обеспечения соосности паяных образцов перед пайкой их помещали в специальное приспособление, в зазор укладывали припой и затем помещали в печь. Паяли в вакууме при температуре ликвидуса припоя с использованием радиационного и контактного нагревов. При контактом нагреве к паяемым образцам прилагали сжимающее давление 10 г/см<sup>2</sup>. Выдержка при температуре пайки в обоих случаях составляла 3 мин, но общее время пайки (до выгрузки из печи) при радиационном нагреве было больше — около 130...140 мин, при контактом нагреве — около 20 мин. Из полученных стыковых паяных заготовок длиной около 140 мм изготавливали цилиндрические образцы для испытаний на статическое растяжение. Размеры рабочей зоны образцов составляли: длина  $l_0 = 50$  мм, диаметр  $d_0 = 10$  мм. В захватных участках образцов нарезали резьбу М16.

Испытания на растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 1497–84. Использовали электромеханическую машину УМЭ-10тм, оснащенную необходимым электронным оборудованием, тензометрическим измерителем деформаций на базе 25 мм и двухкоординатным самописцем Н307/1. Отклонения измеряемой наг-

Таблица 1. Температура плавления припоев, °С

№ припоя	Базовая система	$T_{\text{сол}}$	$T_{\text{лик}}$
1	Cu–Ti	950	990
2	Cu–Mn–Ni–Fe–Si	810	890
3	Ti–Zr–Ni–Cu–V–Be	748	857
4	Ti–Zr–Ni–Cu	830	955

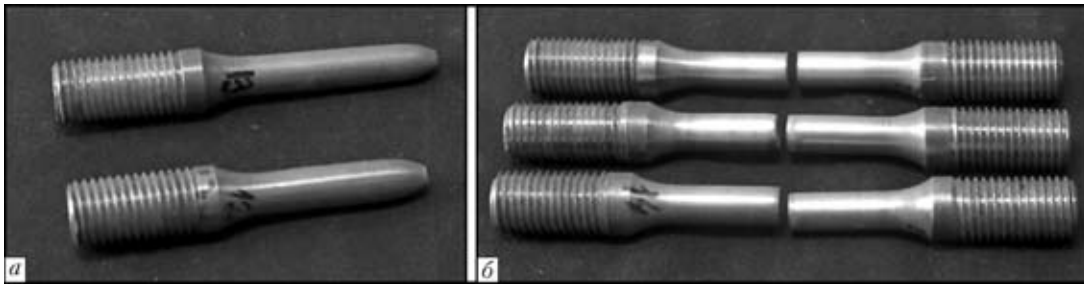


Рис. 1. Внешний вид образцов после механических испытаний: *a* — основной металл; *б* — паяные соединения

рузки не превышали  $\pm 1\%$ . Температура испытан- ный составляла 20...24 °С.

Определяли условные значения пределов прочности  $\sigma_B$ , текучести  $\sigma_{0,2}$  и упругости  $\sigma_{0,01}$ , а также относительное удлинение на базе 25 мм  $\delta_{2,5}$ , сужение  $\psi$  и модуль упругости  $E$ . При испы- таниях записывали диаграмму деформирова- ния  $F$  (нагрузка) и  $\Delta l$  (удлинение образца). Для определения значений  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{0,01}$ ,  $E$  скорость пере- мещения захвата испытательной машины составляла  $8 \cdot 10^{-3}$  мм/с, а дальнейшие испытания до полного раз- рушения проводили со скоростью  $8 \cdot 10^{-2}$  мм/с. После достижения значения остаточного относительного удлинения  $\epsilon \geq 0,2\%$  нагрузку снижали до  $F = 0$ . После перестановки режима перемещения захвата и масштаба записи диаграммы испытания про- должали до полного разрушения.

Диаметр рабочей зоны образцов до  $d_0$  и после испытаний  $d_n$  измеряли в трех различных сече- ниях по двум взаимно перпендикулярным нап- равлениям. В паяных образцах измерения прово- дили в сечениях по зоне соединения с помощью микрометра МКО-25 с ценой деления 0,01 мм.

Относительное удлинение  $\delta_{2,5}$  при разрушении определяли по диаграмме деформирования для ба- зы измерителя деформации  $OL = 25$  мм и изме- рением остаточного удлинения между базовыми отметками на образце  $\Delta l = l_U - l_O$ . Для этого перед испытанием на поверхности образцов наносили легкие поперечные риски для базы измерения 25 мм с двух сторон от центра шва. Для выяв- ления характера неравномерного деформирования в пределах базовой длины на поверхности образ-

цов (РМ-1, РМ-2, № 3, 4, 7, 8, 13, 14) со снятыми шлифованием неровностями наносили дополни- тельно поперечные риски: в зоне шва через 1 мм, а за его пределами через 2 мм. Для нанесения поперечных рисок и измерения удлинения ис- пользовали инструментальный микроскоп БИМ-1, имеющий микрометрические винты с ценой де- ления 0,005 мм. По данным замеров определяли относительные остаточные локальные удлинения

$$\delta_{l_i=1} = \frac{l_{U,i} - l_{O,i}}{l_{O,i}} \cdot 100\% ,$$

где  $l_{U,i}$ ,  $l_{O,i}$  — расстояние между рисками после и до испытаний соответственно.

При растяжении образцы основного металла РМ-1 и РМ-2 разрушались со значительной пластической деформацией в пределах рабочей (про- порциональной) части образца с образованием шейки в зоне разрушения (рис. 1, *a*). Структура поверхности разрушения в исходном состоянии однородная, характеризуется ямочным вязким рельефом (рис. 2, *a*).

Отжиг приводит к увеличению (в 2 раза) ло- кальных значений остаточного относительного удлинения по сравнению с неотожженным образ- цом (табл. 2, рис. 3). Однако вследствие разру- шения образца в отожженном состоянии за пре- делами базы измерения он показал более низкое значение остаточного относительного удлинения  $\delta_{2,5}$ .

После термообработки прочность сплава Glid- сор Al-25 понижается на 60 МПа (табл. 2), т. е. его прочность соответствует 430 МПа. Излом но- сит вязкий характер, но ямки имеют больший раз- мер (около 10 мкм), чем в предыдущем образце

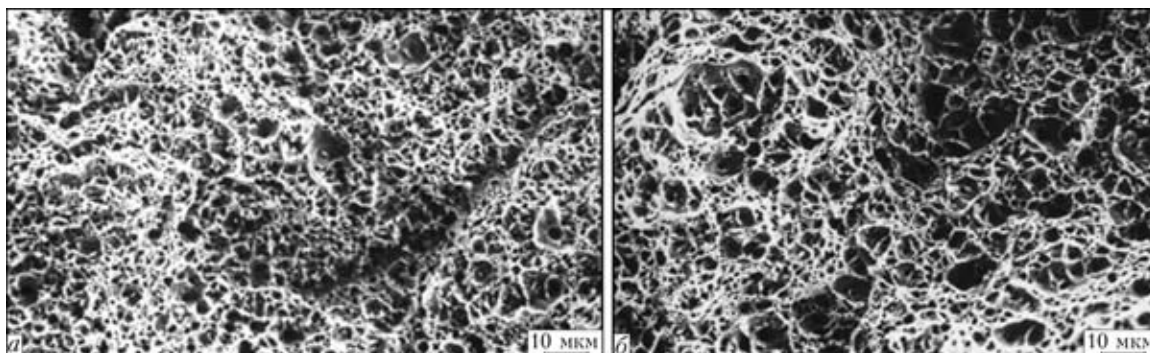


Рис. 2. Фрактографии поверхности разрушения основного металла в исходном состоянии (*a*) и после отжига (*б*)



Таблица 2. Результаты испытаний на растяжение основного металла и стыковых паяных соединений медного сплава Glidcop Al-25

Номер образца	Система легирования припоя	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,01}$ , МПа	$E$ , МПа	$\delta_{2,5}$ , %	$\psi$ , %
PM-1	—	491,5	440,6	245,1	108606	10,4	68,8
PM-2*	—	430,1	351,9	243,6	101365	7,2	75,8
1	Cu-Ti	353,2	337,4	230,8	94594	0,561	2,7
2	Cu-Ti	353,4	333,1	219,5	99925	0,79	2,31
3*	Cu-Ti	397,2	322,7	217,2	96970	1,42	5,99
4*	Cu-Ti	382,4	320,3	218,6	94365	3,89	5,41
5	Cu-Mn-Ni-Fe-Si	111,9	>111,9	111,9	93898	0,05	0,10
6	Cu-Mn-Ni-Fe-Si	253,9	>253,9	191,2	98727	0,07	0,50
7*	Cu-Mn-Ni-Fe-Si	305,3	304,1	202,5	97388	0,27	1,69
8*	Cu-Mn-Ni-Fe-Si	282,6	>282,6	215,2	95785	0,09	1,00
9	Ti-Zr-Ni-Cu-V-Be	310,3	>310,3	245,1	91539	0,07	0,99
10	Ti-Zr-Ni-Cu-V-Be	234,3	>234,4	234,3	99917	0,01	0,20
11	Ti-Zr-Ni-Cu	136,8	>136,8	>136,8	108823	0	0,60
13**	Cu-Ti	387,1	322,1	223	92300	4,2	16,4
14**	Cu-Ti	376,6	322,2	197,1	99160	2,5	8,4
15**	Cu-Mn-Ni-Fe-Si	357,9	334	214,7	99914	0,6	2,04
16**	Cu-Mn-Ni-Fe-Si	305	>305	214,9	100833	0,12	0,56

\* Предварительный отжиг. \*\* Пайка с помощью контактного нагрева.

(см. рис. 2, б), что возможно при частичном укрупнении упрочняющей фазы.

При испытаниях паяных образцов на растяжение разрушение происходило по шву с минимальной пластической деформацией основного металла в околосшовной зоне (см. рис. 1, б). Определено, что при использовании припоев на базе систем Ti-Zr-Ni-Cu (табл. 2) и Ti-Zr-Ni-Cu-V-Be получена самая низкая прочность паяных соединений, соответственно 137 и 234...310 МПа. На поверхности излома присутствует большое количество участков с хрупким разрушением (рис. 4, а, б).

Более высокие значения прочности получены при использовании припоя системы Cu-Mn-Ni-Fe-Si, хотя разброс значений существенный (порядка 140 МПа). Проведение предварительной термической обработки паемого материала при радиационном нагреве позволяет повысить прочность на разрыв с 112...254 до 283...305 МПа. Дальнейшее увеличение прочности ( $\sigma_b = 305...358$  МПа) достигается при использовании контактного нагрева (табл. 2, образцы № 15, 16), который обеспечивает быстрый нагрев и охлаждение, а также минимальное время пайки. Кроме того, приложение сжимающего усилия способствует выдавливанию части жидкого припоя из зазора, что тоже положительно влияет на механические свойства паяных соединений. Анализ полученных данных показывает, что применение

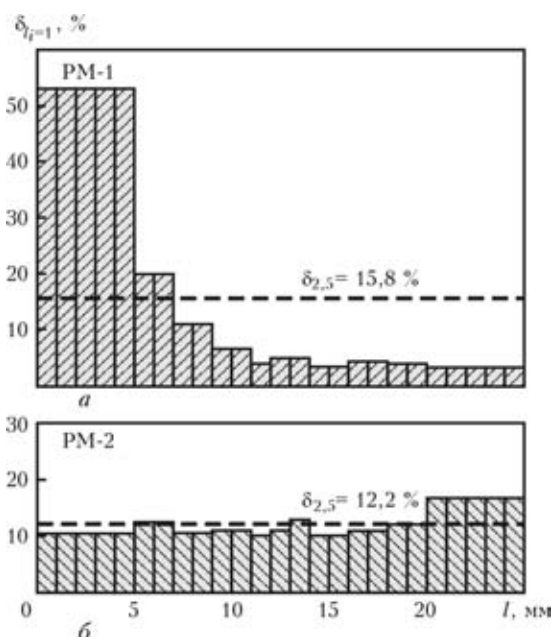


Рис. 3. Характер распределения остаточного относительного удлинения при испытаниях на растяжение цилиндрических образцов из сплава Glidcop Al-25 в исходном состоянии (а) и после отжига (б)

контактного нагрева позволяет уменьшить время пайки (примерно в 6-7 раз) по сравнению с радиационным нагревом и одновременно повысить прочность паяных соединений примерно на 50 МПа при пайке припоем на базе системы Cu-Mn-Ni-Fe-Si.

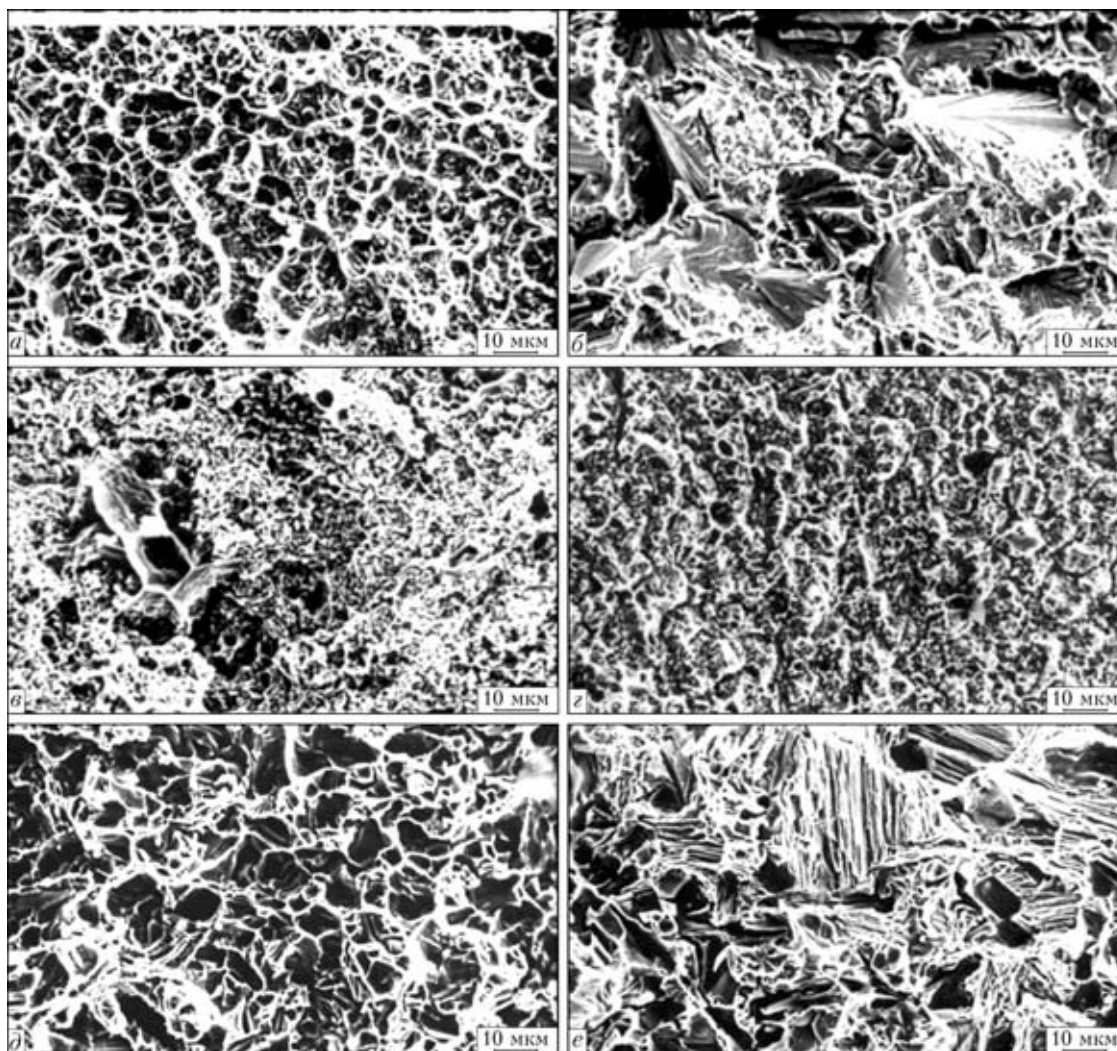


Рис. 4. Фрактографии изломов паяных соединений дисперсно-упрочненного медного сплава, полученных с помощью припоев № 4 (а), 3 (б), 2 (в, з), 1 (д, е)

Результаты фрактографических исследований характера разрушения паяных соединений показали, что на топографию поверхности изломов влияет состав паяного шва, т. е. микроструктурные составляющие шва. Так, поверхность излома образца № 6 ( $\sigma_B = 254$  МПа, радиационный нагрев) отличается смешанным характером разрушения с большим количеством гребней отрыва (рис. 4, в). На поверхности излома наблюдаются единичные частицы, содержащие до 20 % мас. алюминия.

Характер разрушения образцов, полученных при пайке тем же припоем (Cu–Mn–Ni–Fe–Si) с помощью контактного нагрева ( $\sigma_B = 305$  МПа), отличается более мелкозернистой структурой. В отдельных частицах массовая доля алюминия уменьшается и составляет около 10 %. Более мелкозернистая структура поверхности разрушения (рис. 4, з) наблюдается у образца № 15, показавшего самую высокую прочность для данного припоя ( $\sigma_B = 358$  МПа). Массовая доля алюминия в белых частицах продолжает уменьшаться и не превышает 6 %. Таким образом, с уменьшением

массовой доли алюминия в паяном шве прочность на разрыв паяных соединений возрастает.

Наилучшие характеристики прочности паяных соединений (при хорошей стабильности) получены при пайке припоем Cu–Ti как при использовании радиационного нагрева ( $\sigma_B = 353$  МПа, табл. 2), так и проходящего тока ( $\sigma_B = 377...387$  МПа). Наблюдается мелкозернистая ямочная структура излома, размер фасеток относительно небольшой и составляет не более 10 мкм. Массовая доля алюминия в шве не превышает 1 %.

Предварительная термическая обработка паяемого материала при радиационном нагреве позволила повысить прочность соединений на растяжение с 353 до 397 МПа, что составляет 81 % прочности основного металла в состоянии поставки и 92 % — после предварительной термической обработки. В то же время при максимальной прочности наблюдается хрупкое разрушение транскристаллитного типа (рис. 4, д, е).

Более наглядно преимущества данного припоя иллюстрируют диаграммы, где представлены средние значения механических испытаний на

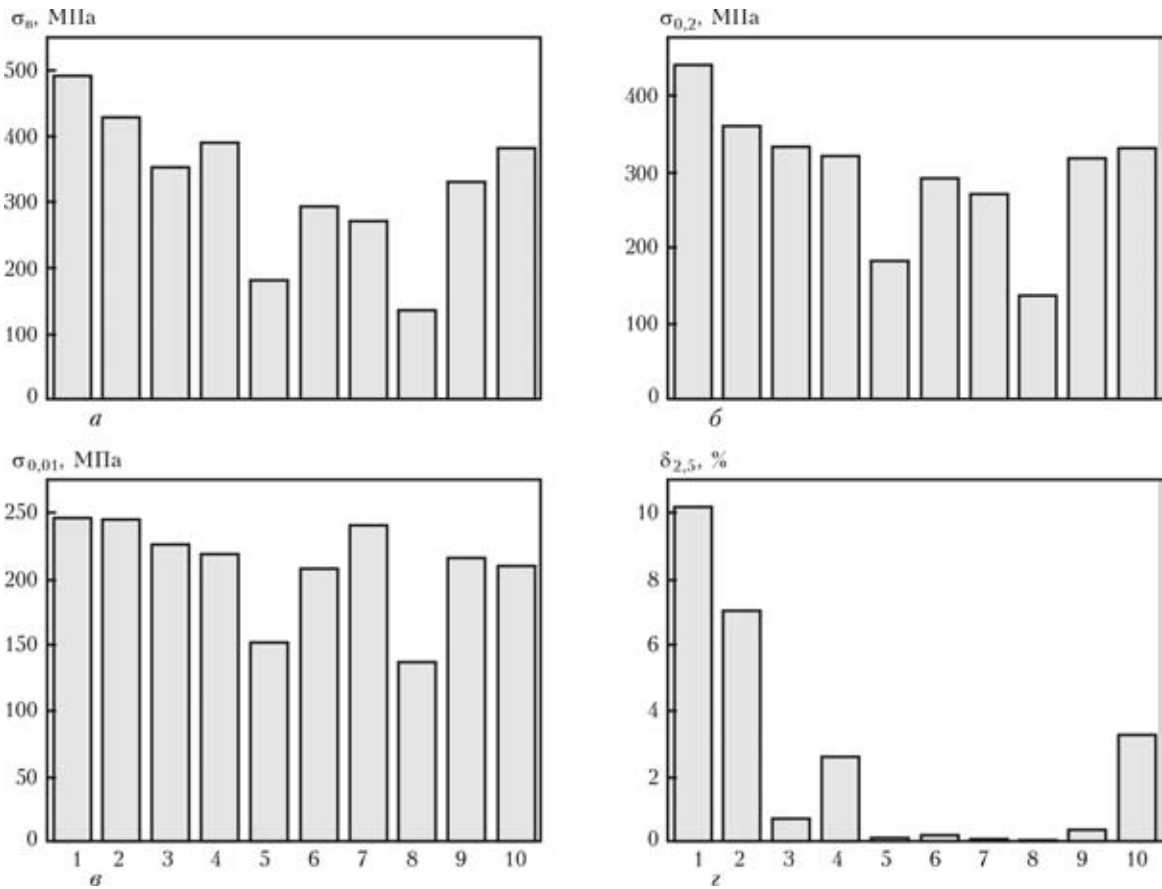


Рис. 5. Диаграммы средних значений механических свойств сплава Glidcop Al-25 в исходном (1) и отожженном состоянии (2) и паяных соединений (3–10), полученных с помощью припоев на базе систем Cu–Ti (3); Cu–Ti<sup>(1)</sup> (4); Cu–Mn–Ni–Fe–Si (5); Cu–Mn–Ni–Fe–Si<sup>(1)</sup> (6); Ti–Zr–Ni–Cu–V–Be (7); Ti–Zr–Ni–Cu (8); Cu–Mn–Ni–Fe–Si<sup>(2)</sup> (9); Cu–Ti<sup>(1,2)</sup> (10); <sup>(1)</sup> — предварительная термическая обработка основного металла при температуре 950°C в течение 1ч; <sup>(2)</sup> — пайка с помощью проходящего тока

растяжение основного металла, а также паяных соединений, полученных с помощью разных припоев (рис. 5, а–в).

Следует отметить, что предварительная термическая обработка при пайке (с радиационным нагревом) приводит к повышению относительного удлинения (рис. 5, г) при пайке припоем Cu–Ti.

Кратковременная прочность на разрыв  $\sigma_{в}$  паяных образцов не превышает условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  неотожженного основного металла, а значения относительного удлинения  $\delta_{2,5}$  более, чем в 2 раза ниже, чем соответствующее значение для основного металла (рис. 5, г). При этом условный предел упругости снижается незначительно.

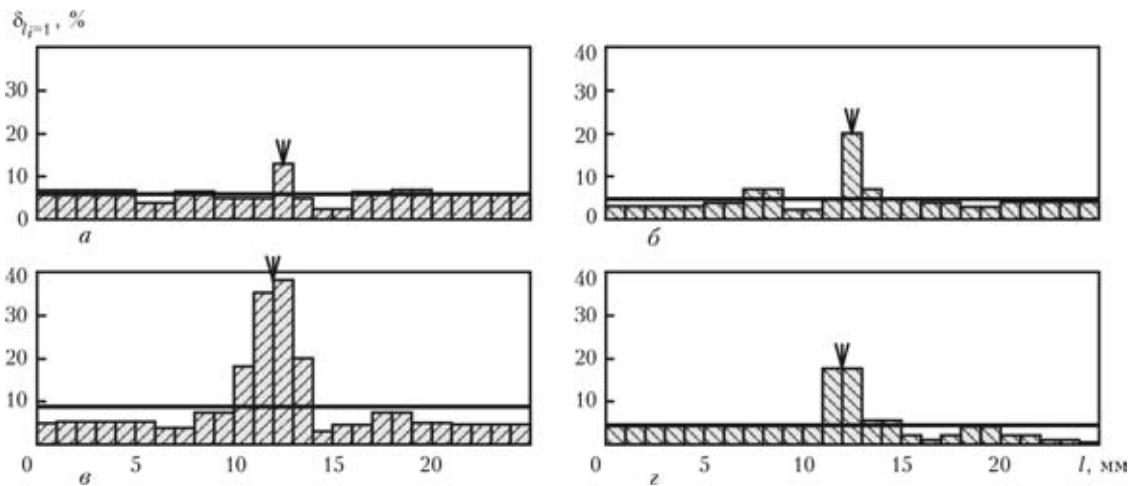


Рис. 6. Характер распределения остаточного относительного удлинения при испытаниях на растяжение стыковых соединений, паяных припоем системы Cu–Ti в вакуумной печи радиационным нагревом: а — образец № 3; б — № 4 и проходящим током; в — № 13; г — № 14 (а —  $\delta_{2,5} = 5,9$ ; б — 4,76; в — 8,86; г — 4,45 %)



При пайке проходящим током тепло в основном выделяется в зоне контактирующих поверхностей, что подтверждает сопоставление характера распределения остаточного относительного удлинения  $\delta_{2,5}$  в стыковых соединениях в отожженном состоянии, полученных с помощью припоя Cu–Ti (рис. 6, в, з).

Прочность на разрыв паяных соединений, полученных с помощью припоя Cu–Ti, при контактном нагреве довольно стабильная (376,6...387,1 МПа), но ниже, чем при пайке радиационным нагревом примерно на 10 МПа. Для данного припоя предпочтителен радиационный нагрев, который благоприятно влияет на структурообразование паяных швов [3] и соответственно на механические свойства паяных соединений.

### Выводы

1. При вакуумной пайке дисперсно-упрочненного медного сплава Glidcop Al-25 припоями системы Ti–Zr–Ni–Cu–V–Be и Ti–Zr–Ni–Cu прочность паяных соединений находится на низком уровне и не превышает соответственно 310 и 137 МПа.

2. Применение припоя Cu–Ti (при радиационном нагреве) в сочетании с предварительной термической обработкой основного металла обеспечивает высокую прочность на разрыв паяного соединения, что составляет 81...92 % прочности основного металла. Существенно сократить время пайки (в 6-7 раз) по сравнению с радиационным нагревом позволяет применение контактного нагрева, но при этом прочность паяных соединений ниже и соответствует 78...89 % прочности основного металла.

1. Кузнецов О. А., Погалов А. И. Прочность паяных соединений. — М: Машиностроение, 1987. — 112 с.
2. Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. 3-е изд., перераб. и доп. — М: Машиностроение, 2003. — 480 с.
3. Максимова С.В., Хорунов В. Ф. Структурные особенности паяных соединений дисперсно-упрочненной меди // Зб. наук. праць НУК. — 2009. — № 428(6). — С. 90–99.
4. Высокотемпературная вакуумная пайка дисперсно-упрочненного медного сплава GLIDCOP Al-25 / С. В. Максимова, В. Ф. Хорунов, В. А. Шонин и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 15–19.

The paper gives the results of investigation of a set of properties of brazed joints of a copper alloy strengthened by dispersed particles of  $Al_2O_3$ , produced by vacuum brazing using adhesion-active braze alloys. It is shown that application of base metal heat treatment in combination with braze alloy of Cu–Ti system ensures rupture strength of welded joints on the level of 81 % of that of as-delivered base metal and 92 % of base metal after preliminary heat treatment.

Поступила в редакцию 26.03.2010

## ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!

*В ИЭС им. Е. О. Патона издан рекламно-информационный буклет «Электронно-лучевая сварка». В нем обобщены сведения о 50-летнем опыте создания в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины оборудования для электронно-лучевой сварки (ЭЛС).*

*ЭЛС имеет прочные позиции в ряде отраслей.*

*В космическом машиностроении введено в эксплуатацию 116 установок для сварки узлов из нержавеющей сталей, сплавов на никелевой основе, титановых, алюминиевых и медных сплавов.*

*В авиастроении России, США, Индии нашли применение крупногабаритные установки КЛ-115 и КЛ-118.*

*В судостроении России, Украины эффективно используются установки УЛ-214 для сварки крупных морских конструкций.*

*В приборостроении нашли применение 10 установок СВ-112/103.*

*За последние 10 лет введено в промышленную эксплуатацию и изготавливаются в данное время 56 комплектов оборудования для ЭЛС, включая установки с объемом вакуумных камер до 100 м<sup>3</sup>.*



**Буклет можно заказать  
в редакции журнала «Автоматическая сварка».**