



УДК 621.791.3

ПАЙКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИПОЯМИ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Чл.-кор. НАН Украины **В. Ф. ХОРУНОВ**, **В. В. ВОРОНОВ**, инж., **С. В. МАКСИМОВА**, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведены исследования по пайке образцов из титановых сплавов алюминиевыми припоями различного состава. Определено, что для получения паяных соединений титановых сплавов приемлемо использование алюминиевых припоев без кремния. Температурный интервал пайки 670...690 °С является оптимальным для выбранных припойных материалов.

Ключевые слова: пайка, титановые сплавы, алюминиевые сплавы, промышленные припои, смачивание, микроструктура, механические свойства

Начиная с 1960-х годов при пайке титановых сплавов широко используют припои на основе алюминия. В качестве припоев в основном применяют чистый алюминий либо сплавы систем Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Mg [1-7]. Составы некоторых стандартных припоев на основе алюминия приведены в табл. 1.

Главными преимуществами алюминиевых припоев являются низкая температура плавления; малый удельный вес; хорошая совместимость с паяемыми титановыми сплавами, в частности, хорошее смачивание и затекание в зазор. Поэтому алюминиевым припоям уделялось особое внимание технологов с момента, когда сплавы на основе титана нашли применение в авиакосмической отрасли.

Существенным недостатком припоев на основе алюминия является активная реакция с основным металлом. Даже относительно короткий проме-

жуток времени контакта титана с расплавленным алюминием может привести к глубокой эрозии основного металла. С целью уменьшения активности чистого алюминия и снижения температуры пайки (и, как следствие, снижения вероятности появления интерметаллидов) припои на основе алюминия легируют кремнием. При этом существует вероятность образования силицидов на границе титановый сплав – припой. Но главную трудность представляет пленка Al_2O_3 на алюминиевых припоях, которая препятствует растеканию их по основному металлу.

Несмотря на большое количество проведенных исследований по пайке титана алюминиевыми припоями в настоящее время на территории Восточной Европы, и особенно в Украине, пайка титана припоями именно такого типа не получила распространения. На сегодня имеются публикации по разработке новых алюминиевых припоев для пайки титановых сплавов [7], свидетельствующие о потребности промышленности в коммерческих среднеплавких припоях для пайки титана и его сплавов.

Таблица 1. Перечень стандартных припоев на основе алюминия

Марка припоя	Страна-производитель	Состав припоя	$T_n, ^\circ C$
АД1	СССР	Al-0,4Si-0,3Fe	665
АЛ2	СССР	Al-13Si	560...700
AVCON 48	США	Al-4,8Si-3,8Cu-0,2Fe-0,2Ni	610...680
AA3003	»	Al-1Mn-0,6Si-0,7Fe	660...670
TiBrazeAl-600	»	Al-12Si-0,8Fe	590...610
TiBrazeAl-630	»	Al-1,5Mg-4Cu-2Ni	630...660
TiBrazeAl-640	»	Al-(4,4-5,2)Mg-(0,7-1)Mn-0,2Cr	640...660
TiBrazeAl-642	»	Al-5,3Si-0,8Fe-0,3Cu-0,2Ti	650...680
TiBrazeAl-645	»	Al-(4,3-5,5)Mg-0,25Si-0,4Fe-0,2Ti-0,2Cr	640...660
TiBrazeAl-655	»	Al-6,3Cu-0,3Mn-0,2Si-0,2Ti-0,2Zr	650...670
TiBrazeAl-665	»	Al-2,5Mg-0,2Si-0,4Fe-0,2Cr	660...680

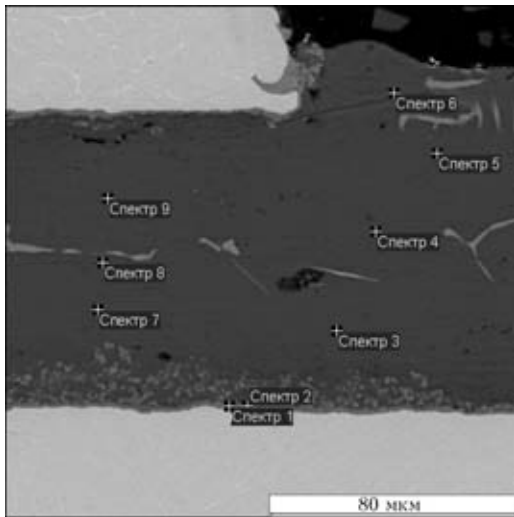


Рис. 1. Микроструктура гальтельного участка паяного соединения из титанового сплава ОТ4, выполненного припоем АМг6

Сдерживание широкого применения алюминиевых припоев в данном случае происходит из-за невысокой прочности полученных паяных соединений, гораздо меньшей, чем прочность соединений, выполненных титановыми припоями. Одним из перспективных направлений использования алюминиевых припоев является пайка пластинчато-ребристых тонкостенных конструкций и тонкостенных сотовых панелей для авиакосмической промышленности, где относительно невысокая прочность паяных швов является приемлемой, что подтверждено, в частности, в работе [7]. Выбору в пользу использования алюминиевых припоев способствует хорошее смачивание и растекание таких припоев по титановой подложке при сравнительно низкой температуре, а также возможность достижения низкого уровня эрозии основного металла при пайке. Таким образом, все недостатки в данном случае перекрываются преимуществами — более низкой ценой, большей доступностью,

лучшей технологичностью алюминиевых припоев по сравнению с титановыми и серебряными.

Целью данной работы является получение данных о преимуществах и недостатках алюминиевых припоев различного состава для пайки титана, а также попытка сравнения современных промышленных припоев и экспериментальных припоев с широко распространенными алюминиевыми сплавами АД1 и АМг6.

В качестве основного металла использовали низколегированный титановый сплав ОТ4. Исследовали две группы алюминиевых припоев для пайки титана: в первой в качестве депрессанта использовали кремний, во второй — магний.

К первой группе относились стандартный сплав АЛ2, современный промышленный припой TiBrazеAl-642, а также экспериментальные сплавы, полученные методом порошковой металлургии Al-12Si-1Mg, Al-12Si-0,3Li, Al-5Si-1,5V. Ко второй группе — сплав АМг6 и современный промышленный припой TiBrazеAl-665. Для сравнения был исследован низколегированный сплав АД1.

Эксперименты по выбору оптимальных режимов нагрева под пайку были проведены в вакуумной печи СВ 2,4-2/15-ИЗ, в вакууме $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Для дополнительной очистки паяльной атмосферы пайку проводили в вакууме в титановом контейнере с геттером.

В табл. 2 приведены краевые углы смачивания сплавов по подложке из титанового сплава ОТ4, измеренные при помощи программы AutoCad 2002LT. При повышении температуры пайки титановых сплавов происходит существенное улучшение смачивания и растекания припоев по подложке. Однако следует отметить, что припой с кремнием TiBrazеAl-642, Al-13Si и Al-12Si-0,3Li плохо растекаются по поверхности титановых образцов вплоть до температуры 700 °С (при 740 °С растекание всех припоев настолько велико,

что вызывает вытекание припоя из зазоров, при этом краевой угол смачивания составляет примерно 0 °С). В то же время припои из сплава АД1 и сплавов с магнием (АМг6 и TiBrazеAl-665) удовлетворительно смачивают титан уже при 670 °С.

Металлографические исследования паяных соединений, выполненных алюминиевыми припоями с магнием, показали наличие сплошной интерметаллидной прослойки на границе припой-основной металл ($T_{II} = 685$ °С; вакуум $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., $t = 3$ мин). Состав прослойки варьируется от (мас. %): 48,67Al-47,95Ti-1,05Si-0,57Mn в гальтельном

Таблица 2. Зависимость краевых углов смачивания от температуры пайки

Припой	$T_L, ^\circ\text{C}$	Температура нагрева под пайку, °С			
		600	630	670	700
		Краевые углы смачивания, град			
АД1 (Al-0,4Si-0,3Fe)	660	—	—	60	~15
АМг6 (Al-6Mg-0,6Mn-0,4Si-0,4Fe-0,1Ti)	632	—	—	20	7...10
TiBrazеAl-642 (Al-5,3Si-0,8Fe-0,3Cu-0,2Ti)	630	—	—	40	~10
АЛ2 (Al-13Si)	578	90	90	55	~25
TiBrazеAl-665 (Al-2,5Mg-0,2Si-0,4Fe-0,2Cr)	650	—	—	25	8...10
Al-12Si-0,3Li	580	90	60	45	~10
Al-12Si-1Mg	575	—	85	40	~15
Al-5Si-1,5V	630	—	—	40	~10

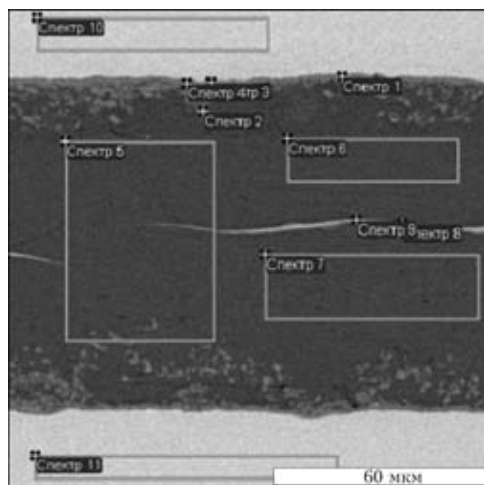


Рис. 2. Микроструктура участка паяного соединения из титанового сплава ОТ4, выполненного припоем АМг6

участке (см. спектр 1 на рис. 1, табл. 3) до $72,68\text{Al}-20,75\text{Ti}-1,33\text{Mg}-0,74\text{Si}-0,36\text{Mn}$ (см. спектр 2 на рис. 2, табл. 4). В первом случае это приблизительно соответствует составу интерметаллидного соединения TiAl_2 , во втором TiAl_3 .

Необходимо отметить также низкое содержание магния в паяном шве — не более 1,5 мас. % (см. табл. 3, 4). Это объясняется испарением магния из металла шва в процессе нагрева и плавления припоя в вакууме. Благодаря этому, видимо, и происходит разрушение пленки оксида алюминия на поверхности припоя, что значительно облегчает смачивание основного металла расплавом припоя. Разрушенная оксидная пленка распределяется по всему паяному шву (см. содержание кислорода в спектрах 1–9 на рис. 1, табл. 3 и 5–9 на рис. 2, табл. 4), кроме интерметаллидной прослойки на границе припой – основной металл.

Включения светлой фазы по оси шва — это соединения алюминия с железом и кремнием, которые присутствуют в сплаве АМг6 в небольших количествах.

Металлографические исследования соединений, выполненных алюминиевыми припоями с кремнием, показали, что паяные соединения отличаются плохим качеством, наличием трещин в швах и галтельных участках. Вдоль шва с обеих границ с основным металлом наблюдается кри-

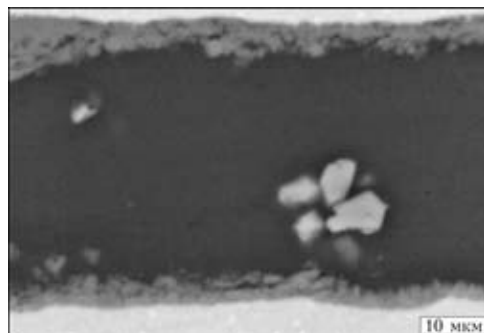


Рис. 3. Микроструктура участка паяного соединения титанового сплава ОТ4, выполненного припоем А1-5Si-1,5V

Таблица 3. Химическая неоднородность галтельного участка паяного соединения из титанового сплава ОТ4, припой АМг6, мас. %

Номер спектра	O	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe
1	1,76	—	48,67	1,05	47,95	0,57	—
2	1,62	—	50,89	1,06	45,83	0,60	—
3	1,13	0,43	97,01	—	0,79	0,64	—
4	0,77	0,49	97,84	—	0,25	0,65	—
5	1,24	0,28	97,78	—	0,13	0,57	—
6	3,01	0,15	95,68	—	0,15	0,69	0,32
7	1,07	0,53	97,01	—	0,77	0,62	—
8	1,78	0,71	96,59	—	0,28	0,63	—
9	1,31	0,71	96,71	—	0,64	0,63	—

сталлизация силицида в виде непрерывной полоски. Такие особенности формирования паяных швов не позволили получить качественные паяные соединения и избежать образования силицидов и трещин (рис. 3).

Для оценки уровня прочности паяных соединений провели испытания на прочность нахлесточных соединений сплава ОТ4, выполненных с использованием промышленных припоев TiBrazAl-665 и TiBrazAl-642, а также сплавов АД1 и АМг6. Толщина фольги припоев составляла 100 мкм для сплавов TiBrazAl-665 и TiBrazAl-642 и 60 мкм для сплавов АД1 и АМг6. Припой в виде фольги располагали в зазоре паяемых образцов. Время выдержки при температуре пайки составляло 3 мин, температура пайки 685 °С. Дополнительно была проведена пайка образцов припоем АМг6 при температуре 720 °С. Результаты механических испытаний показаны на рис. 4.

Из приведенных данных можно отметить, что прочность соединений, выполненных припоями с

Таблица 4. Химическая неоднородность участка паяного соединения из титанового сплава ОТ4, припой АМг6, мас. %

Номер спектра	O	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe
1	—	0,46	64,12	1,32	33,55	0,30	0,25
2	4,14	1,33	72,68	0,74	20,75	0,36	—
3	—	—	54,42	1,34	43,83	0,41	—
4	—	0,75	68,94	1,10	28,78	0,43	—
5	1,16	1,43	96,22	—	0,60	0,59	—
6	1,12	1,25	96,35	—	0,74	0,54	—
7	1,23	1,46	96,47	—	0,30	0,54	—
8	1,64	0,96	81,16	0,48	0,30	1,99	10,13
9	1,15	1,05	85,72	0,46	0,30	1,66	9,66
10	—	—	4,49	—	94,95	0,56	—
11	—	—	3,59	—	95,90	0,51	—

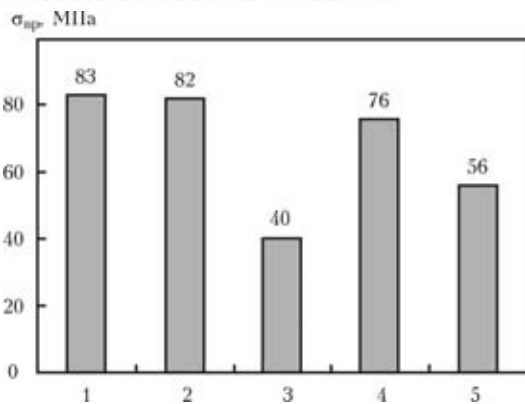


Рис. 4. Прочность нахлесточных соединений сплава ОТ4 (время выдержки 3 мин), запаянных следующими припоями: 1 — TiBrazеAl-642; 2, 3 — АМг6; 4 — АД1; 5 — TiBrazеAl-665 (1, 2, 4, 5 — $T_{п}$ = 685; 3 — 720 °С)

магнием TiBrazеAl-642 и АМг6, практически одинакова и составляет 82...83 МПа, прочность же припоя с кремнием TiBrazеAl-665 низкая, что может быть связано с кристаллизацией силицида в виде непрерывной полоски на границе припой — основной металл.

Следует отметить, что полученная прочность соединений, паяных промышленными припоями TiBrazеAl-665 (Al-2,5Mg-0,3Cr) (83 МПа), оказалась ниже, чем заявленная производителем [7] (порядка 98 МПа). Заявленных значений не удалось достигнуть и после изменения конфигурации паяемых образцов, которое было направлено на уменьшение изгибающей составляющей напряжений при испытании на срез. Полученная прочность паяных соединений составила те же 83 МПа. Возможно в наших экспериментах не учитывалось какое-то ноу-хау авторов.

Повышение температуры пайки крайне отрицательно влияет на прочность соединений, паяных алюминиевыми припоями. Так, при пайке сплавом и АМг6 при температуре 720 °С выявлено двукратное падение прочности (поз. 3 на рис. 4), которое в данном случае можно объяснить увеличением прослойки Ti_3Al вследствие усиления активности алюминия к титану при повышении температуры и увеличения времени контакта жидкого припоя с титановой подложкой.

Полученная прочность паяных соединений (порядка 83 МПа), выполненных алюминиевыми припоями, является вполне достаточной при пайке сотовых, пластинчато-ребристых конструкций и пайке листовых изделий с большой площадью контакта. Главным плюсом алюминиевых припоев в данном случае будет, как уже указы-

валось выше, технологичность, дешевизна и доступность.

Анализ полученных результатов показывает, что температура пайки 680...690 °С приемлема для получения паяных соединений титановых сплавов с помощью алюминиевых припоев, не содержащих кремний, в частности, сплавов АД1, АМг6, TiBrazеAl-642. Время выдержки при пайке титана данными припоями должно быть минимально возможным для предотвращения образования хрупких интерметаллидных прослоек.

Выводы

1. Определено, что для получения паяных соединений титановых сплавов приемлемо использование алюминиевых припоев без кремния, например, АД1, АМг6, TiBrazеAl-642. Наилучшие результаты были получены с использованием припоев на базе системы Al-Mg (АМг6, TiBrazеAl-642).

2. Температурный интервал пайки 680...700 °С является оптимальным для выбранных припойных материалов. Время выдержки при пайке титана данными припоями должно быть минимально возможным для предотвращения образования хрупких интерметаллидных прослоек.

3. При применении припоев на основе системы алюминий — кремний в паяных швах, кроме интерметаллидных прослоек на базе алюминия и титана, наблюдается образование силицидов. Они формируются в виде непрерывной полосы вдоль паяного шва со стороны основного металла, что способствует образованию дефектов в виде трещин.

1. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1977. — 328 с.
2. Wells R. R. Low temperature large-area brazing of damage tolerant structure // *Welding J.* — 1975. — 54, № 10. — P. 348–356.
3. Kimbal C. E. Aluminum brazed titanium acoustic structures // *Ibid.* — 1980. — 59, № 10. — P. 26–30.
4. Нестеров А. Ф., Студенов Г. В. Пайка нахлесточных соединений из титана алюминиевыми припоями // *Материалы семинара «Повышение качества и эффективности сварочного производства на предприятиях города Москвы».* — М., 1987. — С. 38–44.
5. Нестеров А. Ф., Долгов Ю. С., Телков А. М. Пайка титановых конструкций алюминиевыми припоями // *Припои для пайки современных материалов / Под ред. А. А. Россошинского.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1985. — С. 39–45.
6. Соколова Н. М., Перевезенцев В. Н. Пайка титана алюминиевыми припоями: *Прогресс // Методы высокотемпературной пайки.* — Киев, 1989. — С. 28–31.
7. Shapiro A. E., Flom Y. A. Brazing of titanium at temperatures below 800 °C: review and prospective applications — http://www.titanium-brazing.com/publications/DVS-Manuscript_1020-Copy2-19-07.pdf.

Investigations on brazing of titanium alloy samples by using different compositions of aluminium filler alloys were carried out. Silicon-free aluminium filler alloys were found to be acceptable for producing the brazed joints on titanium alloys. The 670...690 °C brazing temperature range is optimal for the selected filler alloys.