



УДК 621.791.3

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИПОЯМИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al–Mg

**В. В. ВОРОНОВ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ.

03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, E-mail: office@paton.kiev.ua

Отмечено, что 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 на основе системы Al–Mg не получила распространения. Однако на сегодня в мире увеличивается количество публикаций, освещающих разработки новых алюминиевых припоев для пайки титановых сплавов, что свидетельствует о потребности промышленности в коммерческих среднеплавких припоях для пайки титана и его сплавов. Целью проведенных исследований являлась разработка технологии пайки титановых сплавов припоями на основе системы Al–Mg. Представлены результаты исследований по пайке образцов из титанового сплава BT1-0 алюминиевыми припоями, выполненных с помощью радиационного нагрева в вакууме. Изучена структурная и химическая неоднородность паяных соединений. Установлено, что для получения качественных паяных соединений титановых сплавов приемлемо использование алюминиевых припоев на основе системы Al–Mg. При пайке макетов секций титановых пластинчато-ребристых теплообменников припоем AMg6 получены плотные бездефектные соединения, прочность которых вполне достаточна для изделий такого типа. Приемлемо использование также припоя TiBrazAl-665. Библиогр. 4, рис. 3.

*Ключевые слова:* пайка, припой, титановые сплавы, алюминиевые сплавы, пластинчато-ребристые теплообменники, сотовые конструкции, микроструктура, механические свойства

При изготовлении теплообменных аппаратов, сотовых конструкций и других сложных изделий машиностроения применение легких сплавов на основе титана и алюминия обеспечивает максимальное уменьшение их массы и повышение прочности, коррозионной стойкости и других эксплуатационных показателей. Наиболее перспективным способом изготовления таких конструкций является пайка.

Пайка пластинчато-ребристых теплообменников — сложный технологический процесс, связанный с одновременным получением швов большой протяженности (в теплообменниках могут быть сотни и даже тысячи метров паяных швов), а также невозможностью исправления образующихся внутри конструкции дефектов. Таким образом, учитывая отмеченное выше, а также высокую активность титана при повышенных температурах, при изготовлении теплообменников из титановых сплавов наиболее перспективной является вакуумная пайка [1, 2].

Состав припоя играет важную роль в процессе пайки пластинчато-ребристых теплообменников. Эрозионная активность припоя должна быть минимальной, поскольку теплообменники изготавливают из тонколистовых элементов. К тому же температура и время пайки теплообменников должны быть таковы, чтобы не допустить нежелательных изменений в структуре и свойствах основного металла [1–3]. Выбор алюминиевых припоев обусловлен их относительно низкой

стоимостью, хорошим смачиванием и растеканием этих припоев по титановой подложке [3, 4] при сравнительно низкой температуре, а также низким уровнем эрозии основного металла при пайке.

Несмотря на большое количество проведенных экспериментальных исследований по пайке титана алюминиевыми припоями, в настоящее время на территории Восточной Европы, и особенно в Украине, пайка титана припоями такого вида не получила распространения. Однако на сегодня в мире увеличивается количество публикаций, освещающих разработки новых алюминиевых припоев для пайки титановых сплавов, что свидетельствует о потребности промышленности в коммерческих среднеплавких припоях для пайки титана и его сплавов.

Цель проведенных экспериментальных исследований — разработка технологии пайки титановых сплавов припоями на основе системы Al–Mg. В качестве материала для изготовления элементов пластинчато-ребристого теплообменника был выбран сплав BT1-0 — практически нелегированный сплав на основе титана, обладающий хорошей для титановых сплавов теплопроводностью. В качестве припоев были выбраны — алюминиевый сплав AMg6 (Al–6Mg–0,6Mn–0,4Si–0,4Fe–0,1Ti) и современный промышленный припой TiBrazAl-665 (Al–2,5Mg–0,2Si–0,4Fe–0,2Cr). Эксперименты по пайке были проведены в вакуумной печи СГВ 2,4-2/15-ИЗ, в вакууме  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. Для дополнительной доочистки паяльной

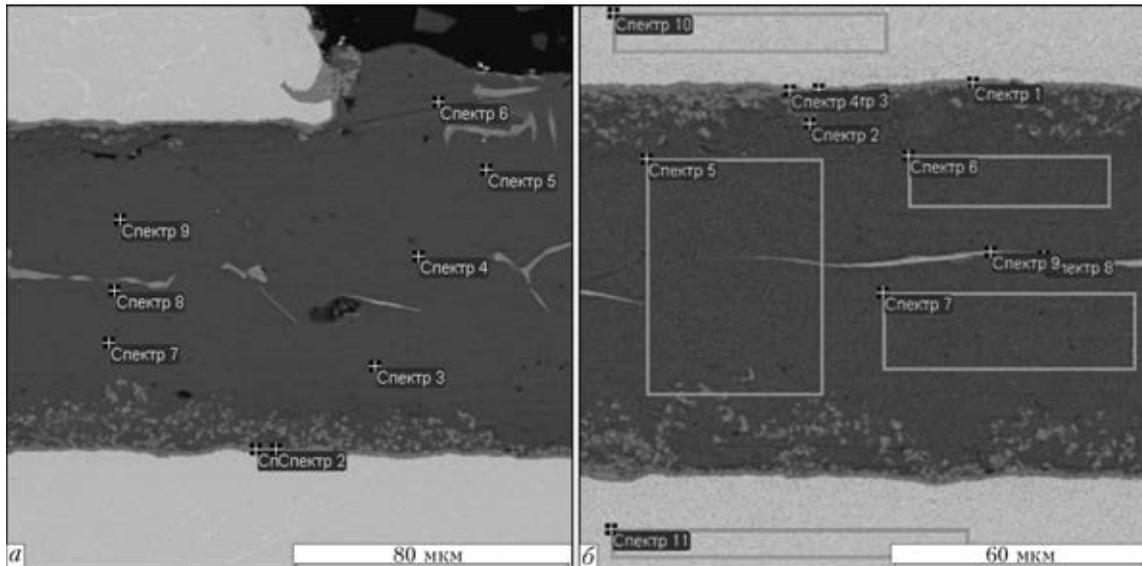


Рис. 1. Микроструктуры галтельного участка (а) и середины шва (б) паяного соединения титанового сплава ВТ1-0, выполненного припоем с магнием (АМг6) ( $T_{\text{п}} = 685 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; вакуум  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.,  $t = 3$  мин)

атмосферы пайку проводили в титановом контейнере с геттером.

Металлографические исследования паяных соединений, выполненных алюминиевыми припоями с магнием (рис. 1), показали наличие сплошной интерметаллидной прослойки на границе «припой–основной металл». Химический состав прослойки (мас. %) изменяется от 49,53Al–48,81Ti–1,06Si–0,6Mn в галтельном участке до 76,16Al–21,73Ti–0,79Mg–0,87Si–0,45Mn в середине шва. В первом случае это приблизительно соответствует составу интерметаллидного соединения  $\text{TiAl}_2$ , а во втором случае —  $\text{TiAl}_3$ . Низкое содержание магния в паяном шве ( $\approx 1,2$  мас. %) объясняется испарением магния из металла шва в процессе нагрева и плавления припоя в вакууме, благодаря чему и про-

исходит разрушение пленки оксида алюминия на поверхности припоя.

Прочность соединений, выполненных с помощью припоя с магнием TiBrazAl–665 и сплава АМг6, практически одинакова и составляет 82...83 МПа. Полученная прочность паяных соединений является приемлемой при пайке сотовых, пластинчато-ребристых конструкций и пайке листовых изделий с большой площадью контакта.

Проведенные эксперименты по пайке секций пластинчато-ребристого теплообменника алюминиевым сплавом АМг6 показали, что паяные швы плотные, дефекты в швах отсутствуют (рис. 2, а). Проведенный анализ микроструктуры паяных соединений показал, что толщина интерметаллид-

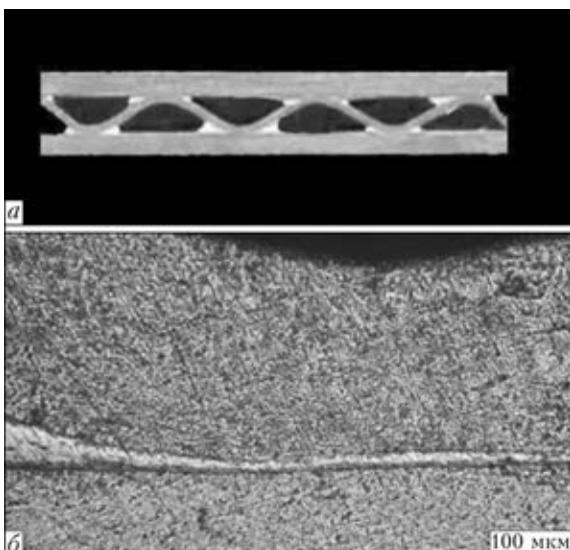


Рис. 2. Фрагмент высокоэффективного пластинчато-ребристого теплообменника (сплав ВТ1-0), полученный с помощью припоя АМг6 (а), и микроструктура ( $\times 100$ ) участка соединения (б) (вакуум  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., контейнер с геттером,  $T_{\text{п}} = 680 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 3$  мин)

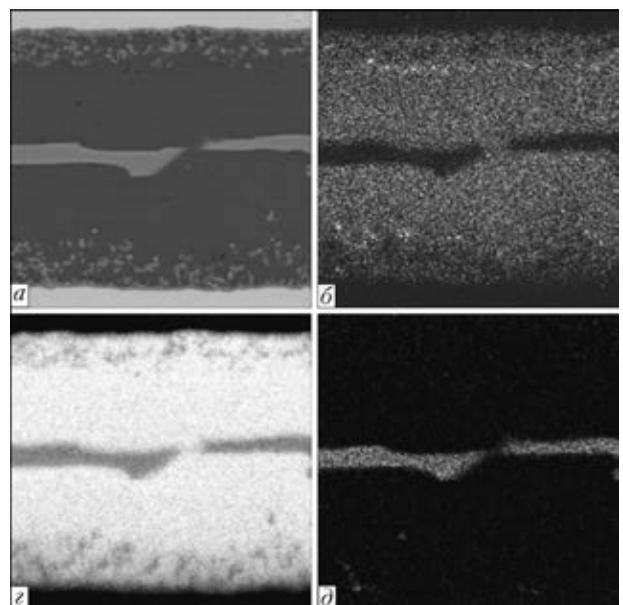


Рис. 3. Микроструктура участка соединения (а) и распределение в нем магния (б), алюминия (в), железа (г) в паяном соединении титанового сплава ВТ1-0, выполненного припоем АМг6 ( $T_{\text{п}} = 685 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , вакуум  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.,  $t = 3$  мин)



ной прослойки максимальна в районе галтелей соединения и не превышает 20 мкм, эрозия основного металла практически отсутствует (см. рис. 2, б, рис. 3, а, в).

Средняя часть шва представляет собой твердый раствор магния в алюминии (содержание магния до 1,2 мас. %). Светлая прослойка по оси шва образована фазой, обогащенной железом (до 8,66 мас. %).

## Выводы

1. Анализ полученных результатов показывает, что для получения качественных паяных соединений титановых сплавов приемлемо использование алюминиевых припоев на основе системы Al-Mg (AMг6, TiBrazAl-665).

2. При пайке макетов секций титановых пластинчато-ребристых теплообменников припоем AMг6 ( $T_{\text{п}} = 680 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 3 \text{ мин}$ ) удалось получить плотные бездефектные соединения, прочность которых вполне достаточна для изделий такого типа.

1. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1977. — 328 с.
2. 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](http://www.titanium-brazing.com/publications/DVS-Manuscript_1020-Copy2-19-07.pdf).
3. Kimbal C. E. Acoustic structures in producing titanium honeycomb acoustic cylinders // *Welding J.* — 1980. — 59, № 10. — P. 26–30.
4. Нестеров А. Ф., Долгов Ю. С., Телков А. М. Пайка титановых конструкций алюминиевыми припоями // Припои для пайки современных материалов. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 1985. — С. 39–45.

Поступила в редакцию 16.11.2012

## НОВАЯ КНИГА

**Коротков В. А. Поверхностная плазменная закалка.** — Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2012. — 64 с.

Среди методов поверхностного упрочнения с помощью концентрированных потоков энергии закалка плазменной дугой занимает особое место как наиболее простая и технологичная операция. Несмотря на ряд очевидных преимуществ этого метода, его широкому распространению в промышленности препятствует, в том числе и недостаточное количество специальной литературы монографического и справочного характера. Рецензируемая книга является монографией и посвящена этому научно-практическому направлению. Настоятельная необходимость в расширении сферы применения поверхностного упрочнения, диктуемая требованиями производства, вполне очевидна, что повышает актуальность издания.

В монографии изложены результаты исследований и производственного опыта, позволившие решить ряд важных проблем повышения эксплуатационного ресурса изделий и технологического оборудования на ведущих предприятиях Урала. Приведены новые данные исследования скорости охлаждения при плазменной закалке, основные результаты по упрочнению промышленных железоуглеродистых сплавов. Показано, что при поверхностной обработке плазменной дугой низкоуглеродистых сталей, обычно не подвергающихся объемной закалке, в их структуре могут образовываться участки мартенсита с высокой твердостью, что позволяет упрочнять ряд корпусных деталей оборудования. Углеродистые и легированные стали под воздействием плазменной дуги могут существенно увеличивать твердость и износостойкость поверхности, продлевая эксплуатационный ресурс изготовленных из них деталей. Для упрочнения штампового инструмента и деталей вагонной тележки рекомендована плазменная поверхностная закалка чугуна.

Большое место уделено обобщению опыта промышленного применения оборудования для ручной плазменной закалки широкой гаммы деталей машин (зубчатые и шлицевые соединения, валы, ролики, барабаны, шкивы, направляющие и т. п.) и технологического оборудования на различных предприятиях. Рекомендованные режимы и технологические приемы упрочнения могут быть использованы для различных деталей аналогичного назначения.

Заключительный раздел книги посвящен методикам расчета экономической эффективности плазменной закалки, где даны систематические рекомендации по учету возможных статей экономии.

Подытоживая, следует отметить, что несомненным достоинством книги являются ее последовательная практическая направленность и информационная насыщенность экспериментально обоснованными научно-технологическими рекомендациями, пригодными для производственного упрочнения типовых изделий машиностроения.

Книга может быть полезна широкому кругу инженерно-технических работников предприятий, студентам и аспирантам металлургических и машиностроительных специальностей.

[www.kompozit.r](http://www.kompozit.r)