



## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6 С ТИТАНОВЫМ ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКОЙ В ВАКУУМЕ

Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, Е. В. ПОЛОВЕЦКИЙ, Л. М. КАПИТАНЧУК

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Во многих отраслях промышленности большой интерес представляет возможность совместного использования сплавов титана и алюминия в виде неразъемных соединений. Однако до настоящего времени исследования, в которых проводилась оценка влияния процесса диффузионной сварки на распределение химических элементов в стыке и на микроструктуру сварного соединения отсутствовали. Металлографическими исследованиями в данной работе установлено, что в ходе процесса сварки магний из АМг6 диффундирует к зоне соединения с ВТ6 и скапливается в приконтактной области. Для устранения негативного влияния магния использовали промежуточную прослойку из сплава АД1. При применении прослойки из алюминия в зоне соединения наблюдается плавное уменьшение концентрации магния от сплава АМг6 к АД1. При этом увеличения концентрации магния у зоны соединения АД1 с ВТ6 не наблюдается. В зоне соединения АД1+ВТ6 обнаружена область диффузионного взаимодействия, в которой титан и ванадий из ВТ6 диффундируют в АД1. Из полученных результатов исследований можно заключить, что при ДСВ сплавов титана со сплавами алюминия, содержащими магний, применение прослойки из чистого алюминия обеспечивает получение качественного сварного соединения с плавным распределением магния в стыке. Основную роль в образовании соединения сплава титана с прослойкой играют процессы диффузии титана и ванадия по направлению к прослойке.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка в вакууме, структура сварного соединения, распределение химических элементов, диффузия, зона диффузионного взаимодействия

Развитие современного машиностроения, аэрокосмической, химической и других отраслей промышленности связано с использованием деталей из сплавов алюминия и титана. Наибольший интерес для конструкторов представляет возможность совместного использования сплавов титана и алюминия в виде неразъемных соединений.

Решить задачу получения изделий из таких материалов можно, применив способ диффузионной сварки в вакууме (ДСВ) [1–3]. Анализ литературы показывает, что для данной пары сплавов до настоящего времени не проводили детальные исследования влияния распределения химических элементов в стыке на микроструктуру сварного соединения [5–7].

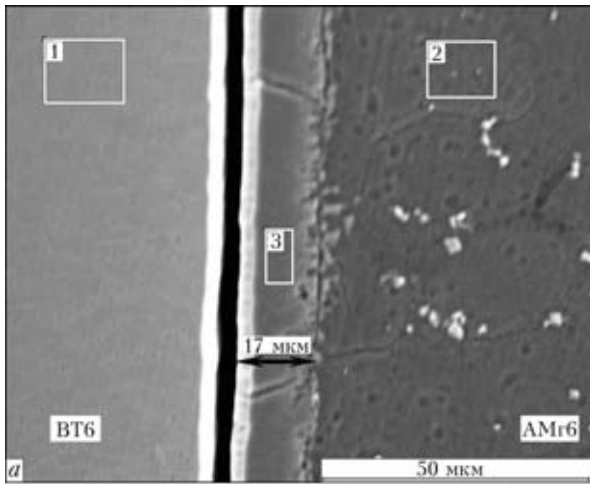
Сварку АМг6 с ВТ6 проводили как без прослоек, так и с применением прослойки из сплава алюминия АД1. Режимы сварки: давление  $P = 20$  МПа, время  $t = 20$  мин, температура сварки  $T = 540$  °С. Исследования проводили на шлифах, изготовленных из исследуемых сварных соединений с последующим их ионным травлением с помощью установки JFC-1100 фирмы «JEOL» (Япония) на специально подобранных и отработанных для исследуемых биметаллических пар режимах. Исследования распределения химических элементов проводили с помощью ОЖЕ-микронзонда JAMP 9500F фирмы

«JEOL», оборудованного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром системы INCA компании «Oxford Instruments» (Великобритания).

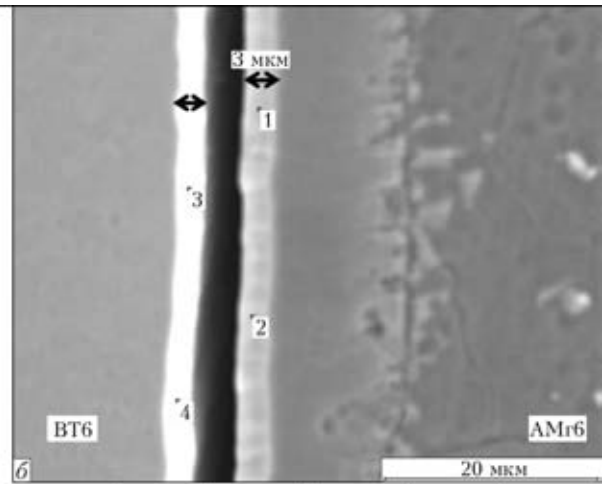
В процессе сварки сплавы подвергаются термомодеформационному воздействию, вследствие чего в стыке происходят рекристаллизационные и диффузионные процессы, оказывающие влияние на структуру и свойства металла.

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям установлено, что получить сварные соединения сплава титана ВТ6 со сплавом алюминия АМг6 способом ДСВ без применения дополнительных технологических приемов не представляется возможным. Разрушение полученных соединений происходит по стыку.

По равновесной диаграмме состояния магний–титан [4] магний не растворим в титане. В ходе процесса сварки магний из АМг6 диффундирует к зоне соединения с ВТ6, скапливается там, образуя область шириной 15...17 мкм с содержанием до 11 мас. % (рис. 1, а). Также в этой области обнаружен титан с содержанием до 15 мас. % и ванадий — до 1 мас. %. На контактирующих поверхностях обоих сплавов обнаружены зоны глубиной 3...4 мкм с повышенным содержанием кислорода (до 9 мас. %). Зона на АМг6 также содержит, мас. %: до 30 Ti, до 2 V и до 9 Mg, зона на ВТ6 содержит до 4,5 Mg (рис. 1, б).



| Спектр | O    | Mg    | Al    | Ti    | V    | Mn   |
|--------|------|-------|-------|-------|------|------|
| 1      | 0,00 | 0,00  | 6,63  | 89,58 | 3,80 | 0,00 |
| 2      | 2,21 | 5,23  | 91,70 | 0,18  | 0,00 | 0,66 |
| 3      | 0,00 | 10,63 | 73,19 | 14,81 | 0,94 | 0,43 |



| Спектр | O    | Mg   | Al    | Ti    | V    |
|--------|------|------|-------|-------|------|
| 1      | 8,49 | 7,32 | 43,12 | 34,07 | 1,99 |
| 2      | 4,81 | 8,77 | 58,10 | 23,95 | 1,62 |
| 3      | 3,03 | 1,91 | 12,78 | 77,76 | 3,72 |
| 4      | 4,54 | 2,42 | 14,30 | 74,18 | 3,97 |

Рис. 1. Микроструктура и распределение химических элементов в сварном соединении АМг6+ВТ6, полученном ДСВ без применения промежуточных прослоек ( $t_{св} = 20$  мин,  $T_{св} = 540$  °С,  $P_{св} = 20$  МПа): а — в области слоя с повышенным содержанием магния и основных металлах; б — в слоях на приконтактных поверхностях

Образование всех этих зон и препятствует получению сварного соединения. Поэтому, во избежание негативного влияния легирующих элементов сплава АМг6, использована промежуточная прослойка из технически чистого алюминия АД1 толщиной 150 мкм. Основная задача прослойки — блокировать диффузию магния как наиболее

активного химического элемента. Толщину прослойки — 150 мкм выбрали согласно литературным данным и ранее проведенным нами экспериментальным исследованиям.

Анализ сварного соединения, полученного ДСВ с применением промежуточной прослойки

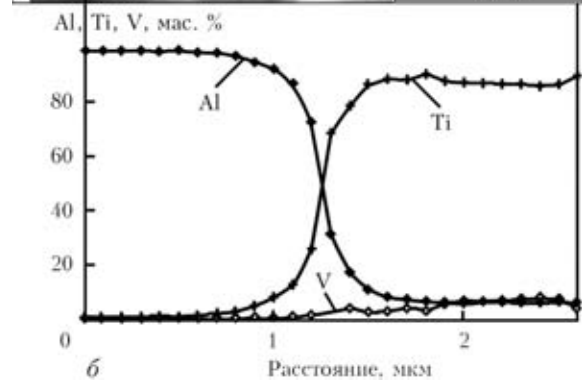
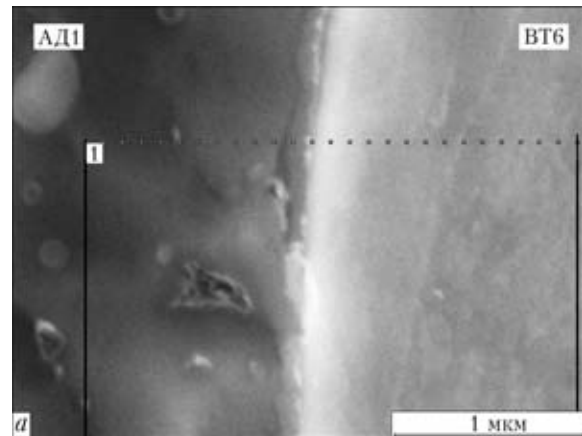
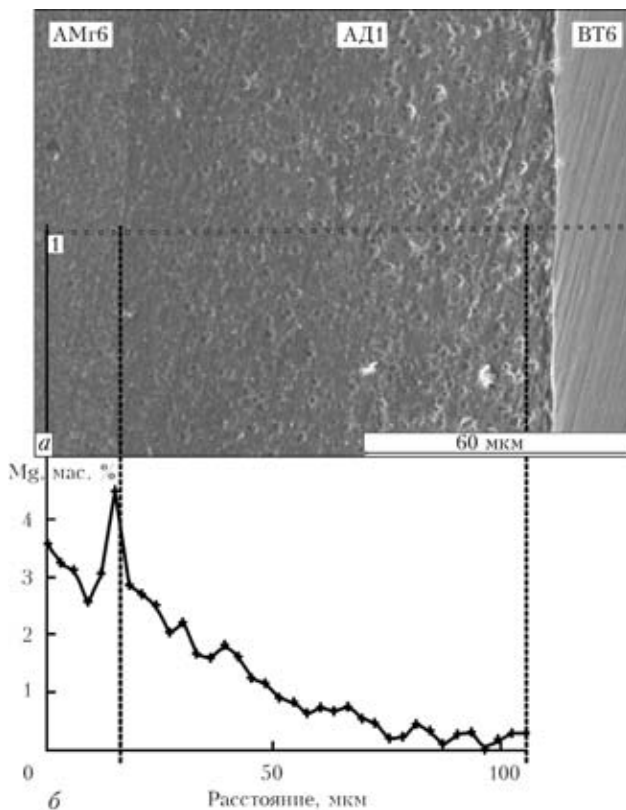


Рис. 2. Микроструктура соединения АМг6+АД1+ВТ6 (а) и распределение магния в зоне соединения АМг6+АД1 (б)

Рис. 3. Микроструктура участка контакта сплава титана с прослойкой (а) и распределение концентрации титана, ванадия и алюминия по нормали к линии соединения АД1+ВТ6 (б)



из АД1, показал, что во время процесса сварки магний из АМг6 диффундирует в АД1 на глубину 60...65 мкм. При этом скопления магния у зоны соединения АД1+ВТ6 не наблюдается (рис. 2). В приконтактной зоне АМг6 образуется участок с пониженным содержанием магния глубиной до 150 мкм. В зоне соединения АД1+ВТ6 обнаружена область диффузионного взаимодействия шириной 1,5...2 мкм (рис. 3). В этой зоне титан и ванадий из ВТ6 диффундируют в АД1 на глубину 0,5...0,8 мкм, а алюминий — в ВТ6. По нашему мнению, образование обнаруженной области диффузионного взаимодействия является основным условием получения качественного сварного соединения.

### Выводы

1. Установлено, что диффузионная сварка сплавов АМг6 с ВТ6 без применения промежуточной прослойки из алюминия не обеспечивает получение сварного соединения вследствие негативного влияния магния.

2. Применение прослойки из алюминия способствует формированию в стыке двух диффузионных зон: АМг6+АД1 и АД1+ВТ6.

3. В зоне соединения, прилегающей к сплаву АМг6, магний в процессе сварки диффундирует в направлении к прослойке из АД1. При этом в сплаве алюминия АМг6 образуется зона с пониженным содержанием магния.

4. В зоне соединения, прилегающей к сплаву ВТ6, наблюдается диффузия ванадия и титана в направлении к прослойке из АД1.

1. Каракозов Э. С. Соединение металлов в твердой фазе. — М.: Металлургия, 1976. — 264 с.
2. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка металлов. — М.: Машиностроение, 1976. — 360 с.
3. Рабкин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М. Сварка разнородных металлов. — Киев: Техніка, 1976. — 208 с.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т. / Под общ. ред. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1996. — Т. 1. — 992 с.
5. Григорьевский В. И. Диффузионная сварка алюминиевого сплава АМг6 с титановым сплавом ОТ4 через композиционную прослойку титан-алюминий // Свароч. пр-во. — 1991. — № 8. — С. 2-4.
6. Toshio E., Kenji I., Toshiharu M. Влияние промежуточных прокладок на свойства соединений Al-Ti, выполненных диффузионной сваркой // J. of Light Metal. Weld. and Constr. — 1978. — 16, № 3. — P. 107-114, 127.
7. Диффузионная сварка Ti-6Al-4V с промежуточной прокладкой из алюминия / K. Akiomi, Y. Akihika, Y. Tashihiro et al. // J. Jap. Weld. Soc. — 1985. — 3, № 1. — P. 145-151.

Поступила в редакцию 07.05.2013

## Зарубежный опыт

### РЕЖИМЫ «Speed Up» и «Speed Pulse» ПРИ СВАРКЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА

*Industrial application of «Speed Up» and «Speed Pulse»  
welding and assessment of the true welding characteristics / C. Sposato //  
Welding and Cutting. — 2012. — 11, № 6. — P. 375-376.*

Как известно, при дуговой сварке металлическим плавящимся электродом в среде инертного газа существует возможность реализации трех основных вариантов переноса металла: короткой дугой (с короткими замыканиями), крупнокапельный перенос (комбинированной дугой), струйный (сосновый) перенос.

Короткую дугу применяют при сварке тонколистового металла на пониженном напряжении дуги, что ограничивает тепловложение. Вариант сварки с крупнокапельным переносом металла желательнее не использовать из-за интенсивного разбрызгивания и потери устойчивости дуги. Сварку со струйным переносом металла используют для соединения металла большой толщины при повышенном тепловложении и высокой скорости плавления электрода, достигаемой выбором повышенной силы тока и напряжения.

Для управления дуговым процессом необходимо задать следующие параметры: напряжение, скорость подачи проволоки и ток. Правильный выбор этих параметров обеспечивает использование одного из указанных выше вариантов переноса металла, и этот выбор зависит от уровня квалификации оператора.

Лорх решил эту проблему путем разработки системы автоматического управления параметрами сварки по сигналам обратной связи. В сравнении с обычным способом сварки металлическим электродом в среде инертного газа способ импульсно-дуговой сварки обеспечивает протекание процесса сварки с заданным вариантом отрыва капли металла, что позволяет снизить тепловложение, обеспечить минимальный уровень разбрызгивания, поэтому рекомендуется для сварки нержавеющей стали и алюминия.