



# ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПЛАКИРОВАНИЕМ ВЗРЫВОМ

С. Ю. ИЛЛАРИОНОВ, инж., Л. Д. ДОБРУШИН, С. Г. ПОЛЯКОВ, доктора техн. наук, Г. Е. БОЕВА, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведена оценка эффективности использования сварки взрывом для плакирования чистым алюминием сварных соединений алюминиевых сплавов 7010 и 2024. Показано, что при такой защите швов исключается возникновение коррозионного растрескивания под напряжением и межкристаллитной коррозии.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, плакирование взрывом, сварка трением с перемешиванием, высокопрочные алюминиевые сплавы, сварные соединения, коррозионное растрескивание под напряжением, межкристаллитная коррозия

Сварные соединения алюминиевых сплавов обладают пониженной коррозионной стойкостью по сравнению с основным металлом, что обусловлено их физико-механической и электрохимической неоднородностью. Последняя особенно характерна для сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов.

С целью предотвращения контакта коррозионной среды с поверхностями шва и зоны термического и термомеханического влияния по заказу фирмы «Airbus Industrie» проведены исследования по локальному плакированию взрывом технически чистым алюминием швов, полученных сваркой трением с перемешиванием (СТП). Это относительно новый способ сварки, запатентованный в 1991 г. Британским институтом сварки. Суть его заключается в том, что специальный вращающийся инструмент внедряется в заготовки в месте расположения стыка. В результате трения выделяется тепло, что приводит к пластификации металла вокруг инструмента, после чего ему или заготовкам сообщают поступательное движение. Металл огибает штырь инструмента и, перемещаясь из зоны нагрева в зону охлаждения, образует соединение. Этот способ характеризуется высокими технологическими возможностями и позволяет получать соединения из широкого спектра алюминиевых сплавов, в том числе термически упрочняемых, а также из сталей и меди [1].

Ранее в ИЭС им. Е. О. Патона исследовали антикоррозионное плакирование взрывом сварных швов реакционных стаканов автоклавов для получения концентрированной азотной кислоты [2]. Аппараты были изготовлены из технического чистого алюминия марки А85 с применением сварки плавлением. Плакирование осуществляли сплавом А85. В результате долговечность реакционных стаканов автоклавов возросла примерно в 6 раз, что доказывает правильность предложенного подхода.

Целью настоящей работы является оценка эффективности использования сварки взрывом (СВ) для плакирования СТП соединений высокопрочных алюминиевых сплавов технически чистым алюминием для повышения их коррозионной стойкости.

Объектом плакирования взрывом и последующих испытаний являлись:

стыковые соединения плит из алюминиевого сплава 7010 Т7651 толщиной 65 мм ( $\sigma_B = 520...525$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 455...465$  МПа,  $\delta = 12...12,5\%$ ), выполненные СТП на глубину до 13 мм;

стыковые соединения листов из алюминиевого сплава 2024 Т351 толщиной 4 мм ( $\sigma_B = 435$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 280$  МПа,  $\delta = 15\%$ ), выполненные СТП на всю толщину пластин.

Плакирование осуществляли листами толщиной 2 мм из сплава 1050 (аналог АД0). Предварительный металлографический анализ сварных образцов показал, что в зоне термомеханического влияния СТП соединений сплава 7010 имеются участки с зёрнами, ориентированными перпендикулярно к поверхности пластины и находящимися на глубине 5 мм. Такое расположение зёрен в наибольшей мере способствует развитию межкристаллитной коррозии (МКК), поэтому для того, чтобы такие участки оказались на поверхности, был удален слой металла толщиной 5 мм. Кроме того, со стороны корня СТП шва сделана выемка для удаления острого концентратора, вызванного неполным проваром по толщине пластины.

Учитывая необходимость плакирования протяженных СТП соединений, использовали параллельную схему СВ, когда плакирующая пластина перед сваркой располагается параллельно плакируемой поверхности. По сравнению с часто используемой угловой схемой она проще в монтаже и характеризуется равенством скорости детонации взрывчатого вещества  $D$  и скорости точки контакта  $V_K$  свариваемых поверхностей. Так как качественное соединение для данных пар металлов реализуется при  $V_K \approx 2$  км/с, то взрывчатым веществом была выбрана смесь аммонита № 6ЖВ с аммиачной селитрой. Скорость соударения двух пластин, определенная по зависимостям из работы [3], составляла примерно 500 м/с. Критериями

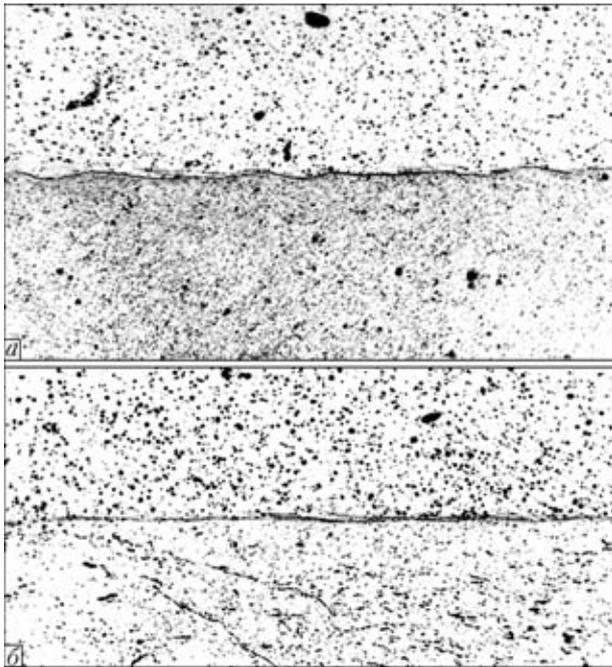


Рис. 1. Микроструктуры зоны соединения плакирующего слоя и металла СТП, шва сплава 7010 (а) и 2024 (б) X100

качества полученного соединения являлись его равнопрочность с металлом плакирующего слоя (сплав 1050), а также отсутствие на границе соединения включений литого металла. На рис. 1 приведены микроструктуры соединений соответственно плакирующего слоя и металла СТП шва сплава 7010 в продольном направлении относительно процесса СВ и плакирующего слоя и металла СТП шва сплава 2024.

Необходимо отметить, что в качестве плакирующего слоя желательно использовать как можно более пластичный металл. Поэтому сплав 1050 перед СВ подвергали отжигу. Кроме того, это способствовало меньшей деформации плакируемых пластин (особенно это актуально для сплава 2024, толщина которого составляла примерно 4 мм). На рис. 2 представлены плакированные взрывом образцы СТП соединений. Для сравнительной оценки коррозионной стойкости плакированных и неплакированных (исходных) СТП соединений проведены испытания на сопротивление коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) и МКК. Испытание СТП соединений алюминиевого сплава 7010 проводили по стандартам ASTM G 39 [4] и ASTM G 44 [5]. Образцы испытывали при нагружении по четырехточечной схеме (рис. 3), при этом нагрузку задавали величиной максимального отклонения  $y$ , которое определяли по формуле

$$y = \frac{\sigma(3H^2 - 4A^2)}{12Et},$$

где  $\sigma$  — задаваемая нагрузка (принимали равной  $0,75\sigma_T$  для неплакированных СТП соединений), МПа;  $E$  — модуль упругости, МПа;  $t$  — толщина образца, мм;  $H$  — расстояние между внешними опорами, мм;  $A$  — расстояние между внутренней и внешней опорами, мм.

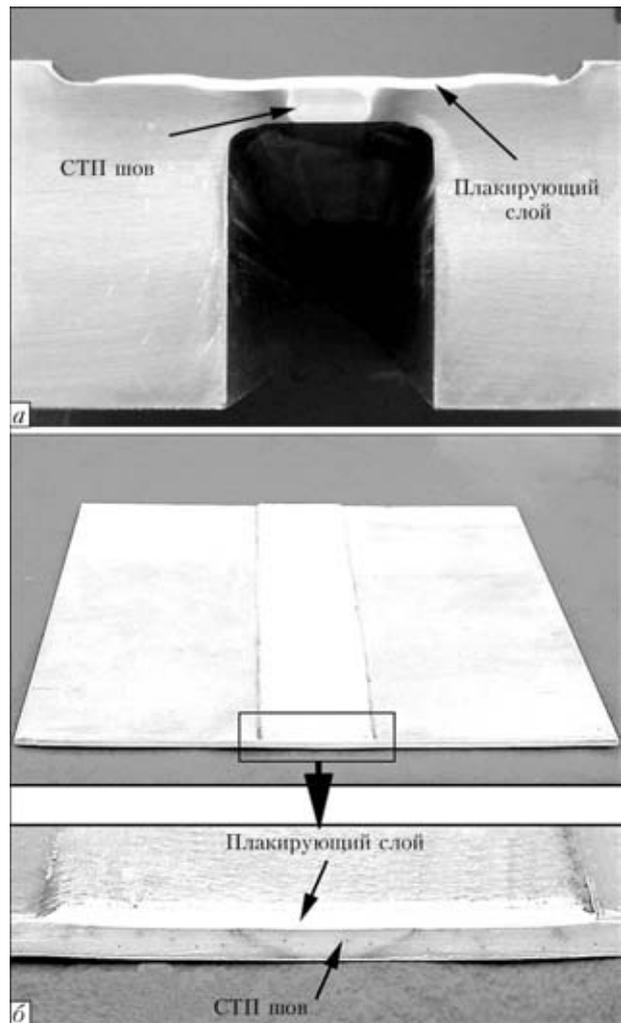


Рис. 2. Плакированные взрывом образцы СТП соединений сплава 7010 (а) и 2024 (б)

Образцы периодически погружали в химический раствор 3,5 % NaCl (рН 6,4...7,2) и проводили испытания по следующему циклу: 10 мин в растворе, 50 мин на воздухе. Продолжительность испытаний составляла 40 дней. Образцы вырезали таким образом, чтобы их длина составляла 120 мм (поперек СТП соединения и направления процесса плакирования), ширина 15 мм (вдоль соединения) и толщина 4 мм. Для того чтобы защитить образцы от воздействия коррозионной среды с торцевых и нижней поверхностей СТП соединений использовали эмаль ЭП-5147 (ТУ У 6.24514086-004-98 «А»).

Испытание СТП соединений алюминиевого сплава 2024 на КРН проводили по стандартам ASTM G 49 [6] и ASTM G 44, на МКК — по

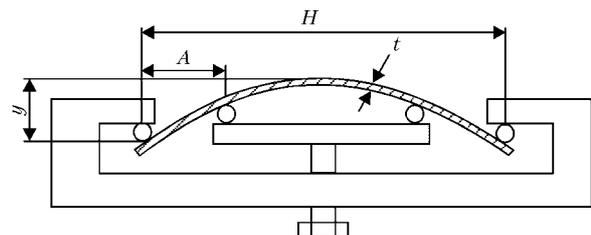


Рис. 3. Схема закрепления образца сплава 7010 для испытания на КРН (обозначения см. в тексте)

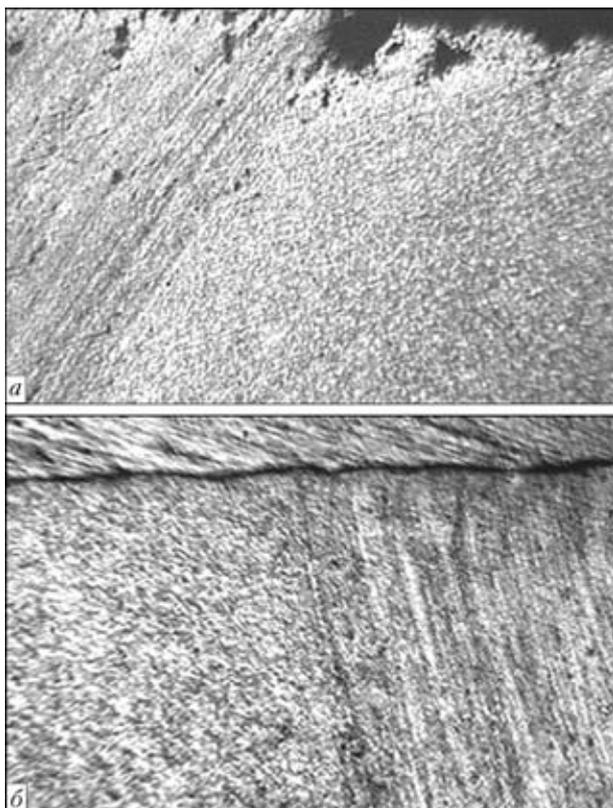


Рис. 4. Микроструктура зоны термомеханического влияния исходного (а) и анодированного (б) СТП соединения сплава 7010 после испытания на КРН,  $\times 100$

стандартам ASTM G 110-92 [7] и QVA-Z10-59-03 [8].

Испытуемые на КРН образцы находились под постоянной растягивающей нагрузкой, которая (как и для образцов с СТП соединением сплава 7010) задавалась равной  $0,75\sigma_t$  для исходных неанодированных соединений. Режим испытаний анодированных и неанодированных соединений СТП сплава 2024 был таким же, как и для соединений СТП сплава 7010, за исключением того, что длительность их выдержки под напряжением и в коррозионной среде составила 30 дней. Образцы для испытания на МКК вырезали таким образом, чтобы их длина была 70 мм (поперек соединения СТП и направления процесса анодирования), а ширина — 50 мм (вдоль соединения). Образцы помещали в коррозионный раствор (57 г NaCl + 10 мл  $H_2O_2$  (30 %) + 1000 мл  $H_2O$ ) и выдерживали в нем 6 ч при температуре 30 °С.

В течение испытаний образцов сплава 7010 (исходных и анодированных) на КРН их полного разрушения не произошло. Исходные образцы с СТП соединением сплава 7010 были полностью покрыты продуктами коррозии. На поверхности анодирующего слоя из сплава 1050 следов коррозии не наблюдается, в то время как на незащищенной части анодированных образцов (основной металл) присутствуют такие же следы коррозии, как и на исходных образцах. Как показал металлографический анализ исходных образцов после проведения испытаний, все они подвержены МКК. Типичная глубина проникновения МКК в наиболее

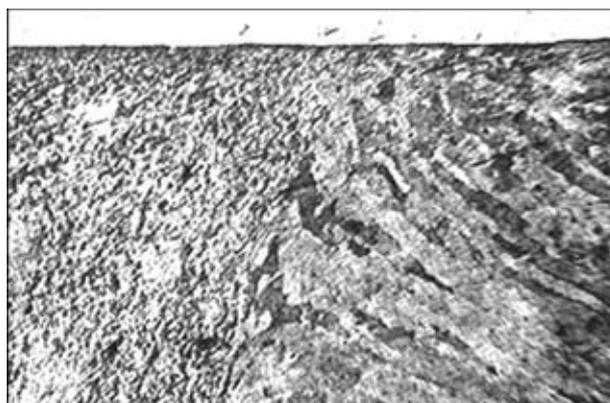


Рис. 5. Микроструктура зоны термомеханического влияния анодированного СТП соединения сплава 2024 после испытания на КРН,  $\times 100$

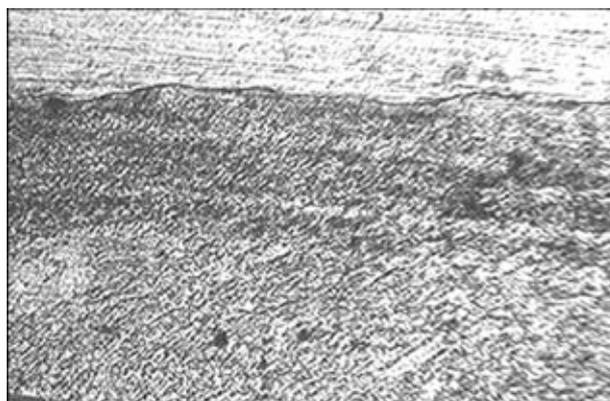


Рис. 6. Микроструктура анодированного СТП соединения сплава 2024 после испытания на склонность МКК,  $\times 100$

опасной зоне термомеханического влияния 150... 160 мкм (рис. 4, а), а в одном случае из всей серии образцов она составляла 720 мкм. В анодированных образцах никаких следов коррозии СТП соединения обнаружено не было (рис. 4, б). Таким образом, присутствие анодирующего слоя из технического чистого алюминия полностью исключает какое-либо воздействие коррозионной среды на защищаемый шов.

При испытаниях на КРН при одноосной растягивающей нагрузке образцов соединения сплава 2024 исходные образцы разрушились в течение испытательного срока. На поверхности анодирующего слоя отмечали наличие питтинговой коррозии, при отсутствии нагрузки она вообще не наблюдалась. Под анодирующим слоем металлографический анализ показал отсутствие коррозии СТП соединения (рис. 5). Таким образом, несмотря на поверхностную питтинговую коррозию анодирующего слоя, последний выполнил свою функцию.

Испытание на МКК показало, что в анодированных образцах следы коррозии полностью отсутствуют (рис. 6). В исходных образцах в зоне шва глубина проникновения коррозии составляет 43 (рис. 7), а в зоне термомеханического влияния — 72 мкм.

В заключение следует отметить, что в анодированных взрывом СТП соединениях сплавов 7010 и 2024 следы коррозии после испытаний на КРН отсутствуют, в то время как в неанодированных

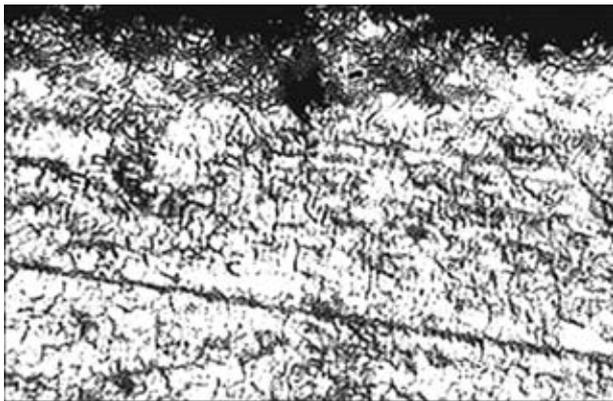


Рис. 7. Микроструктура исходного СТП соединения сплава 2024 после испытания на МКК,  $\times 100$

соединениях сплава 7010 глубина проникновения МКК составляет 150... 160 мкм, а соединения сплава 2024 разрушились. Кроме того, при испытаниях на МКК даже при отсутствии нагружения глубина проникновения коррозии в СТП соединения сплава 2024 достигает 72 мкм.

Evaluation of explosion welding application was conducted for the case of cladding welded joints of aluminum alloys 7010 and 2024 with pure aluminium. It is shown that such a protection of welds prevents stress corrosion cracking or intercrystalline corrosion.

Проведенные исследования показали высокую эффективность предложенного метода защиты сварных соединений, полученных СТП, высокопрочных алюминиевых сплавов от воздействия коррозии, что позволяет рекомендовать его для использования на практике.

1. Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2002. — № 7. — С. 10–18.
2. Коррозионная стойкость сварных соединений алюминия после плакирования взрывом / В. Г. Петушков, М. И. Зотов, С. Г. Поляков и др. // Там же. — 1989. — № 1. — С. 21–24.
3. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 166 с.
4. ASTM G 39: Standard practice for preparation and use of bent-beam stress-corrosion test specimens.
5. ASTM G 44: Standard practice for evaluating stress-corrosion cracking resistance of metals and alloys by alternate immersion in 3,5% sodium chloride solution.
6. ASTM G 49: Standard practice for preparation and use of direct tension stress-corrosion test specimens.
7. ASTM G 110: Standard practice for evaluating intergranular corrosion resistance of heat-treatable aluminum alloys by immersion in sodium chloride + hydrogen peroxide solution.
8. QVA-Z10-59-03: Intergranular corrosion test for age-hardenable aluminium alloys.

Поступила в редакцию 28.05.2004

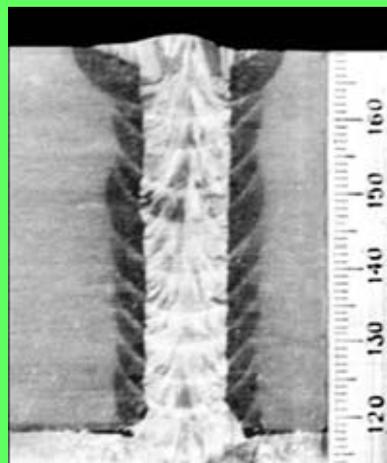
## СВАРКА ТИТАНА В УЗКИЙ ЗАЗОР ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ В АРГОНЕ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ДУГОЙ

Сварка осуществляется в узкий зазор (8–10 мм) вольфрамовым электродом диаметром 4–5 мм в защитной атмосфере аргона в переменном магнитном поле, обеспечивающим перемещение дуги с одной вертикальной кромки на другую и равномерное их проплавление. Для заполнения зазора и получения шва применяется присадочная проволока диаметром 2,5–4,0 мм.

По сравнению с известными способами сварки титана большой толщины (погруженной дугой, MIG, ЭПС) данный способ сварки имеет следующие преимущества:

- более низкое тепловложение при сварке и сокращение протяженности зоны термического влияния;
- упрощение подготовки кромок и снижение стоимости подготовительных операций;
- уменьшение расхода сварочной проволоки и электроэнергии;
- обеспечение высокого качества сварных соединений независимо от толщины соединяемых элементов.

**Назначение.** Способ сварки предназначен для выполнения швов на титане и его сплавах при толщине свариваемых деталей от 20 до 110 мм.



03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
ИЭС им. Е. О. Патона, отд. № 30  
Тел./факс: (38044) 227 13 66  
E-mail: zamkov@paton.kiev.ua