

## РЕАКТИВНО-ФЛЮСОВЕ ПАЯННЯ АЛЮМІНІЮ З ТИТАНОМ

О.М. Сабадаш, С.В. Максимова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

При паянні різнорідних з'єднань алюмінію АД1 з титаном ВТ1-0 при температурі 605...610 °С припоєм Al–12Si в аргоні застосування реактивного флюсу  $KAlF_4-10K_2SiF_6$  з добавками сполук  $CoF_2$ ,  $K_2ZrF_6$ , сприяє формуванню якісного з'єднання за рахунок утворення на контактній поверхні легкоплавкого сплаву системи Al–Si. Новоутворений при реактивно-флюсовому паянні легкоплавкий сплав системи Al–Si може самостійно виконувати функцію припою при формуванні з'єднання з різнорідних металів. Відновлений з флюсу кобальт мало впливає на структуру шва і міцність з'єднання. При застосуванні припою Al–12Si і реактивного флюсу  $KAlF_4-10K_2SiF_6-5K_2ZrF_6$ , який містить калій–цирконій фторид ( $K_2ZrF_6$ ), спостерігається певне подібнення структури (дендритів твердого розчину на основі алюмінію) паяного шва зі сторони алюмінію, що сприяє підвищенню міцності на зсув паяних з'єднань алюміній – титан. Бібліогр. 33, табл. 3, рис. 8.

*Ключові слова:* алюміній, титан, реактивно-флюсове паяння, припій Al–Si, реактивний флюс системи  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$  паяне з'єднання

**Вступ.** Конструкції з алюмінію і титану є оптимальними за співвідношенням міцність/вага, мають високу корозійну стійкість і міцність та характеризуються широким спектром потенційних застосувань в автомобільній та аерокосмічній промисловості.

На даний час активно розробляються методи зварювання і паяння алюмінію з титаном, механічно навантажені з'єднання яких використовуються в конструкціях різних виробів. Формування якісного з'єднання алюмінію і титану, а також їх сплавів є складною проблемою через значну відмінність фізико-хімічних властивостей металів (температура плавлення, коефіцієнт теплового розширення, теплопровідність, корозійна стійкість), активну взаємодію з газами ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ), присутність на поверхні щільної плівки з тугоплавких оксидів і здатність утворювати крихкі інтерметалідні сполуки.

Ефективне використання електромагнітного випромінювання, присаджувального матеріалу, конфігурації з'єднання при лазерному зварюванні-паянні [1–6]; вдосконалення геометричної форми оберտального інструмента і оптимізація режимів його руху при зварюванні тертям з перемішуванням [7–9] – це не повний комплекс засобів, спрямованих на руйнування високостабільної оксидної плівки, створення сприятливої структури шва і міцного з'єднання. При точковому зварюванні-паянні тертям з перемішуванням (близько температури плавлення евтектики Zn–Al) алюмінієвого сплаву A2014 і сплаву Ti6Al4V застосування подвійного покриття (Al і Zn) на титані підвищує (на 110 %) міцність з'єднання на зсув [10] порівняно з традиційною технологією.

Високотемпературне паяння в вакуумі (очищеному аргоні) алюмінієвим припоєм нижче критич-

ної температури: ( $T < 800$  °С) титану, ( $T < 630$  °С) алюмінію, їх сплавів є кращим вибором щодо вартості та збереження механічних властивостей з'єднання з різнорідних металів [11–16]. Обмеження температури обумовлено небажаними змінами мікроструктури і властивостей як тонкоштинного основного металу, так і з'єднання: тобто нижче  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -фазового перетворення в Ti [17, 18] і значної втрати міцності алюмінієвого сплаву при нагріві [19]. При взаємодії титану з рідким алюмінієм і припоями (систем Al–Me (Me = Ag, Cu, Si), Al–Si–Cu, Al–Si–Mg) утворюються крихкі інтерметалідні сполуки за стехіометричним складом близькі до  $TiAl_3$  [20–22],  $Al_2Ti$  [23] і  $Al_xSi_yTi_z$  [12, 14, 24, 25], прошарок з яких по-різному впливає на міцність паяного з'єднання. Наприклад, збільшення часу витримки ( $t \leq 25$  хв) при температурі паяння 620 °С сприяє підвищенню міцності паяного припоєм Al–12Si–1Mg з'єднання Al/Ti [12]. При температурі 620 °С в результаті дифузії кремнію з припою в Al проходить ізотермічна кристалізація твердого розчину, а на титані утворюється подвійний шар з інтерметалідних сполук  $Al_5Si_{12}Ti_7$ ,  $Al_{12}Si_3Ti_5$ .

Попереднє нанесення проміжного шару зі сплаву (67Ag–33Al) або покриття (50Zn–50Al) на титан при паянні припоєм Al–Si шляхом занурення в розплав флюсу [26] і у вакуумі [27] не призводить до суттєвого зростання міцності на зсув ( $\tau_{zc} \leq 40$  МПа) з'єднання Al/Ti.

За результатами досліджень встановлено, що застосування реактивного флюсу сольової системи  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$  покращує змочування і формування з'єднання між деталями при високотемпературному паянні алюмінієвих сплавів з низьким ( $\leq 0,7$  мас. %) вмістом магнію і алюмінію зі сталлю [28–30]. При реактивно-флюсовому паянні

проходить активне очищення контактної поверхні алюмінію, за короткий час зі сполуки  $K_2SiF_6$  відновлюється кремній, в результаті дифузії в рідкому стані змінюється його вміст в шві і, відповідно, властивості з'єднання з однорідних і різнорідних металів.

Покращення змочування припоєм алюмінію і титану при флюсовому паянні, поверхня яких вкрита міцною тугоплавкою оксидною плівкою, і можливість легування шва елементами, відновленими з реактивного фторидного флюсу, є чинником формування якісних з'єднань вузлів з різнорідних матеріалів.

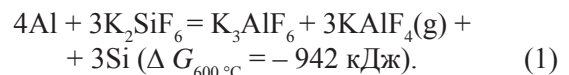
У даній роботі представлені результати досліджень структури і міцності з'єднання титану з алюмінієм, сформованого з застосуванням припою Al-12Si і порошкового флюсу сольової системи  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$  з добавками  $CoF_2$ ,  $K_2ZrF_6$  в температурно-часових режимах, що визначені для високотемпературного паяння алюмінію в аргоні.

**Матеріали і методика експерименту.** Для експериментів використовували таврові зразки (підкладка розміром  $40 \times 40 \times 1$  мм, стрічка –  $40 \times 5 \times 1$  мм, складені з вузьким зазором розміром менше 0,1 мм) з алюмінієвого сплаву АД1 та титану ВТ1-0, припій АК12 системи Al-Si (табл. 1) і негігроскопічні реактивні флюси:  $KAlF_4-10K_2SiF_6$ ,  $KAlF_4-10K_2SiF_6-CoF_2$ ,  $KAlF_4-10K_2SiF_6-5K_2ZrF_6$ .

Методом препаративного синтезу із застосуванням реагентів (фтористоводневої кислоти HF, гідроксидів алюмінію  $Al(OH)_3$  і калію КОН, діоксиду кремнію  $SiO_2$ ) одержували реактивний флюс  $KAlF_4-10K_2SiF_6$ . Змішуванням реактивного флюсу з додаванням готових хімічних сполук  $CoF_2$  (хч),  $K_2ZrF_6$  (хч) отримували необхідні композиції однорідної дисперсної порошкової суміші. Перед паянням металеві зразки очищали в водних розчинах: 15% NaOH – знежирювали, 20 об. %  $HNO_3$ , 2 об. % HF – травили та промивали між операціями в дистильованій воді. Таврові зразки складали шляхом розміщення стрічки з алюмінієвого сплаву (титану) на підкладці основного металу. Вздовж лінії контакту стрічки з підкладкою основного металу наносили порошковий флюс вагою ~ 0,06 г (в верхній зоні зразка) та наважку (0,17 г) алюмінієвого припою Al-12Si з флюсом (в нижній зоні зразка). Флюсове паяння здійснювали при температурі  $600...620 \pm 2$  °C у середовищі чистого аргону (об. %): 99,987Ar, 0,002O<sub>2</sub>, 0,01N<sub>2</sub>, 0,001H<sub>2</sub>O при  $T_p = -58$  °C). Зображення зразка отримували за допомогою цифрової ка-

мери Panasonic FZ-30. Мікроструктуру паяних з'єднань досліджували за допомогою оптичного (Neophot-32) і скануючого растрового електронного мікроскопу (JSM840). Міцність паяних з'єднань визначали випробуванням на розтяг насувних зразків (складені дві пластини розміром: довжина 55 мм, ширина робочої частини 15 мм, товщина 1,0 мм) на розривній машині Р-5 з максимальним зусиллям 50 кН. Для проведення розрахунків вільної енергії Гіббса використовували математичні методи обробки з застосуванням програми HSC 6.0.

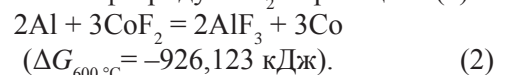
**Результати досліджень та обговорення.** За розрахунками (за допомогою програми HSC 6.0) зміни вільної енергії Гіббса ( $\Delta G$ ) встановлено характер проходження хімічних реакцій (1), (2) при взаємодії алюмінію з хімічними сполуками ( $K_2SiF_6$ ,  $CoF_2$ ) в умовах високотемпературного паяння:



Результатом взаємодії алюмінію з гексафторсилікатом калію ( $K_2SiF_6$ ) за реакцією (1) можливим є відновлення кремнію в складі подвійного фториду.

Проведені дослідження взаємодії реактивного флюсу сольової системи  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$  на алюмінієвій підкладці (що вище температури утворення подвійної евтектики Al-Si) в атмосфері аргону високої чистоти показали [31], що на поверхні алюмінію відбуваються два процеси: відновлення кремнію зі складу гексафториду калію і контактно-реактивне плавлення кремнію з алюмінієм. В результаті такої взаємодії формується металічний шар системи Al-Si, який покращує змочування і капілярні властивості припою та може самостійно виконувати функцію припою при заповненні вузького зазору.

За результатами розрахунку в умовах високотемпературного паяння кобальт може відновлюватись алюмінієм зі фториду  $CoF_2$  за реакцією (2):



Рівновага процесів (1) і (2) повністю зміщена в бік продуктів взаємодії.

Послідовність хімічних реакцій (3) і (4) взаємодії фторцирконату калію ( $K_2ZrF_6$ ) з алюмінієм, що відбуваються при високих температурах, досліджена в роботі [32]:



Таблиця 1. Хімічний склад основних матеріалів і припою, мас. %

Метал	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Al	O	N	H	C
АД1	0,15	0,30	0,30	0,05	0,02	0,05	0,10	99,3	–	–	–	–
ВТ1-0	0,1	0,15	–	–	–	–	–	–	0,2	0,04	0,01	0,07
АК12	10...13	<1,5	<0,6	<0,5	<0,1	<0,1Zn	<0,1	–84,3	–	–	–	–

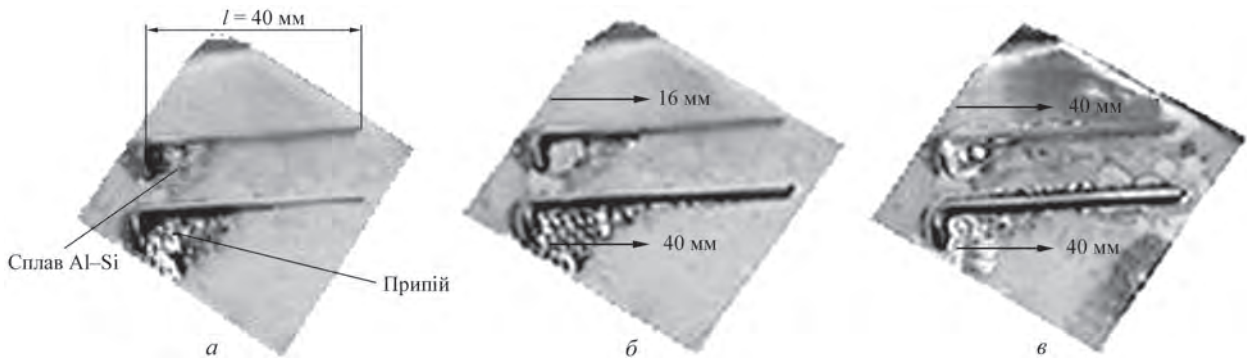


Рис. 1. Зовнішній вигляд таврового зразка з розплавленим припоєм Al–12Si і флюсом  $\text{KA1F}_4\text{–}10\text{K}_2\text{SiF}_6$  після нагріву до температури: а – 585 °С,  $t_0$ ; б – 605 ± 2 °С,  $t = 8$  с; в – 605 ± 2 °С,  $t = 16$  с (в) з'єднання алюмінію (АД1)

Рентгеноструктурний аналіз підтверджує появу в продуктах реакцій (3), (4) сполук  $\text{KA1F}_4$ ,  $\text{K}_3\text{AlF}_6$ ,  $\text{Al}_3\text{Zr}$  [32]. При використанні припою системи Al–Si кремній реагує з  $\text{K}_2\text{ZrF}_6$ . На основі результатів рентгеноструктурного аналізу продуктів, отриманих після нагрівання в вакуумі сумішей  $\text{K}_2\text{ZrF}_6 + (\text{Si})$  або  $\text{K}_2\text{ZrF}_6 + (\text{Al–7Si})$  при 700 °С, показано, що реакція між  $\text{K}_2\text{ZrF}_6$  та кремнієм не відбувається [32]. При температурних режимах паяння є можливим відновлення (процеси 1-3) алюмінієм металів Si (умовно відноситься до металів), Co, Zr з хімічних сполук  $\text{K}_2\text{SiF}_6$ ,  $\text{CoF}_2$ ,  $\text{K}_2\text{ZrF}_6$ .

Взаємодія в гетерогенній системі «сольовий розплав (флюс  $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$ ) – металевий сплав (припій Al–Si) – твердий метал (Al, Ti)» визначає характер змочування і формування припоєм міцного нероз'ємного з'єднання при паянні.

Для дослідження формування паяного з'єднання зі сплаву АД1 використовували таврові зразки зі стрічкою сплаву АД1, в нижній зоні якого розміщено припій Al–12Si з флюсом, а в верхній зоні – лише флюс (рис. 1, а). При нагріванні такого зразка до температури 605 °С в нижній зоні відбувається заповненню зазору, довжина якого сягає 40 мм (рис. 1, б), а в верхній зоні (при застосуванні лише флюсу) зазор заповнюється на довжину  $L = 16$  мм (новоутвореним легкоплавким сплавом Al–Si). Збільшення часу витримки при нагріві даного зразка до 16 с призводить до завершення формування з'єднання новоутвореним легкоплавким сплавом системи Al–Si (рис. 1, в). Підвищення температури з моменту розплавлення припою є головним чинником покращення змочування і капілярних властивостей припою при формуванні з'єднання. Висока взаємна розчинність розплавленого припою і новоутвореного легкоплавкого сплаву, які належать до однієї металевої системи Al–Si, позитивно впливає на кінетику заповнення вузького зазору.

Таким чином, на основі проведених досліджень встановлена послідовність протікання процесу формування паяного з'єднання алюмінію в середовищі аргону: розплав флюсу сольо-

вої системи  $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$  змочує і очищує поверхню металу; новий стан поверхні (очищений) активує процес відновлення кремнію з флюсу (алюмінієм), подальша взаємодія кремнію з алюмінієм в результаті контактного плавлення сприяє утворенню легкоплавкого сплаву Al–Si у вигляді суцільного шару, який покращує змочування припоєм основного металу. У випадку відсутності припою новоутворений сплав (Al–Si) під дією капілярних сил заповнює зазор і при охолодженні відбувається його кристалізація (рис. 1). В обох випадках ми отримуємо якісне паяне з'єднання, що відрізняється лише шириною паяного шва.

При паянні алюмінію з титаном без присаджування припою нагрів до температури 585 °С теж призводить до відновлення кремнію з флюсу на контактній поверхні алюмінію і формування легкоплавкого сплаву системи Al–Si, який покращує змочування обох основних металів та самостійно виконує функцію припою в процесі паяння. Отриманий зразок алюмінієвої підкладки з титановою стрічкою свідчить про хороше заповнення капілярного зазору (рис. 2).

Відмінність змочування алюмінієвим припоєм системи Al–Si титанової підкладки в тому, що на контактній поверхні утворюється прошарок з інтерметалідних сполук [20, 23].

Результати проведених експериментів показали, що з метою заповнення припоєм зазору при паянні титану з алюмінієм і використанні в якості підкладки титану (лише з флюсом), необхідно під-

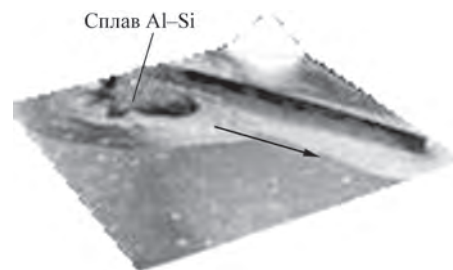


Рис. 2. Зовнішній вигляд таврового зразка АД1 (підкладка)/ВТ1-0 (стрічка) з флюсом  $\text{KA1F}_4\text{–}10\text{K}_2\text{SiF}_6$  без застосування припою після нагріву до температури 605 ± 2 °С,  $t = 18$  с в аргоні



вищити температуру та збільшити час витримки до близько 1,5...2,5 разів (рис. 3).

Подальше підвищення температури паяння (на 5...7 °С) сприяє формуванню з'єднання титанової підкладки з алюмінієвою стрічкою як з використанням припою Al-12Si, так і без присаджування припою з застосуванням реактивного флюсу  $\text{KAIF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6$ .

На основі проведених експериментів визначено температурний інтервал ( $T = 610 \pm 2$  °С) формування якісного паяного з'єднання Al/Ti (на підкладці з Al і Ti) в аргоні високої чистоти зі 100 % з заповненням вузького ( $a \leq 0,1$  мм) зазору при застосуванні реактивного флюсу  $\text{KAIF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6$  і припою Al-12Si та тільки флюсу – без присаджування припою. Паяння основних металів проводиться при температурі близько 0,95 від температури солідусу алюмінієвого сплаву, а

подальше підвищення температури може привести до повного знеміцнення, наприклад, елементів тонкостінної конструкції. Активне проходження хімічної реакції між сольовим розплавом флюсу і контактною поверхнею основного металу обмежує час витримки при температурі паяння.

Детальне дослідження мікроструктури з'єднань, що отримані шляхом реактивно-флюсового паяння з застосуванням припою показало хороше формування швів (рис. 4, а-б, а). Зразки паяли за однакових температурно-часових режимів: температура  $610 \pm 2$  °С, час витримки  $t = 30$  с. За результатами металографічних досліджень встановлено, що при застосуванні припою (Al-Si) і флюсу  $\text{KAIF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6$  структура паяного шва складається з дендритів твердого розчину на основі алюмінію ( $\alpha\text{-Al}$ ), евтектики Al-Si (e), яка виділяється в міждендритних проміжках і суціль-

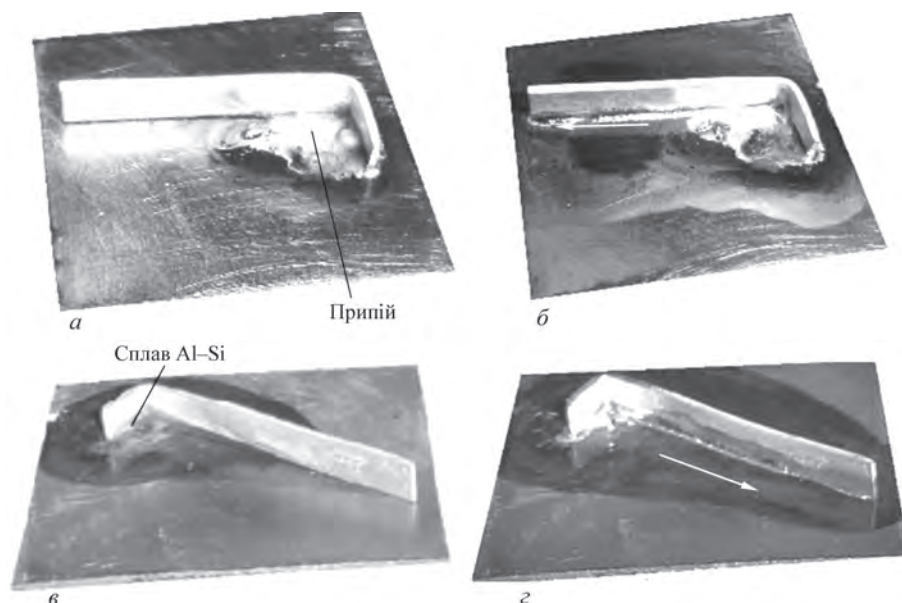


Рис. 3. Зовнішній вигляд таврового зразка ВТ1-0 (підкладка)/АД1(стрічка) з припоєм Al-12Si і флюсом  $\text{KAIF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6$  після нагріву до температури: 585 °С,  $t_0$  (а);  $610 \pm 2$  °С,  $t = 26$  с (б) і без присаджування припою (585 °С,  $t_0$ ) (в); після кристалізації з'єднання ( $610 \pm 2$  °С,  $t = 44$  с) (г) в аргоні

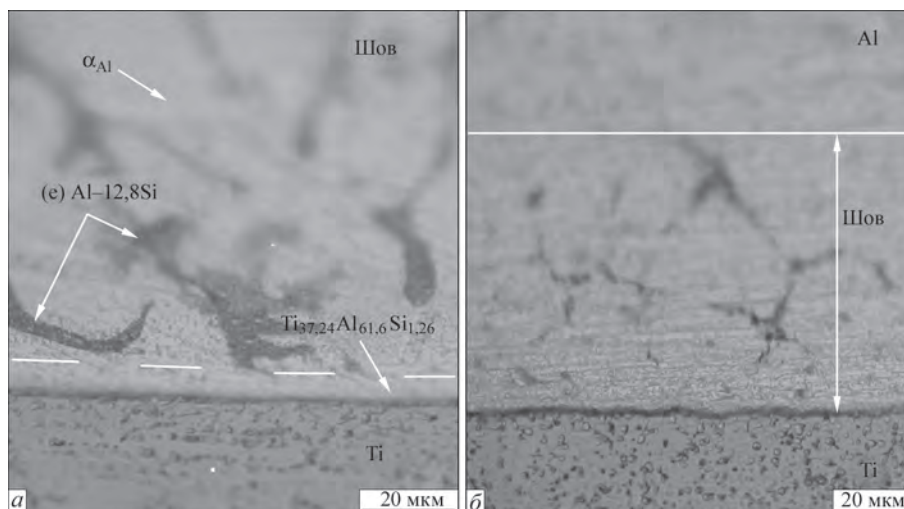


Рис. 4. Мікроструктура з'єднання Al/Ti, паяного з припоєм Al-12Si і флюсом  $\text{KAIF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6$  (а); без присаджування припою лише з флюсом  $\text{KAIF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6$  (б)

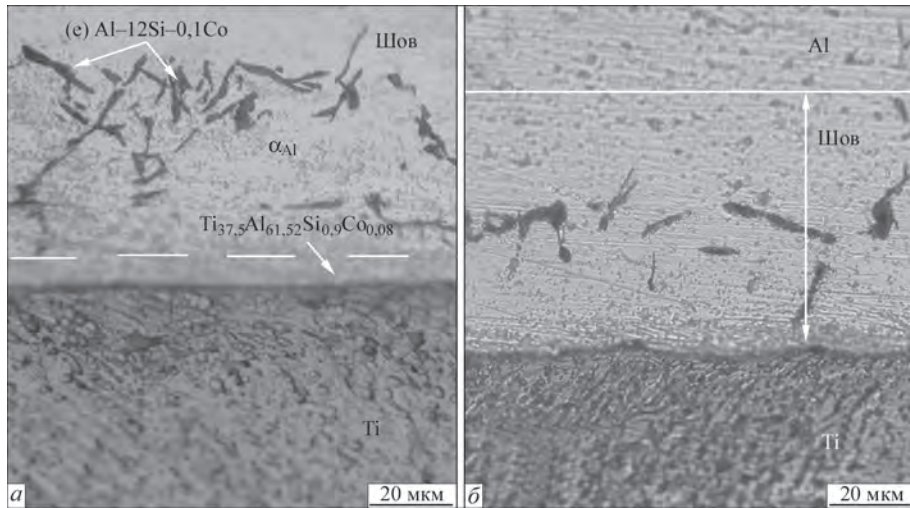


Рис. 5. Мікроструктура з'єднання Al/Ti, паяного припоєм Al–12Si і флюсом  $KAlF_4-10K_2SiF_6-2CoF_2$  (а), флюсом  $KAlF_4-10K_2SiF_6-2CoF_2$  без присаджування припою (б)

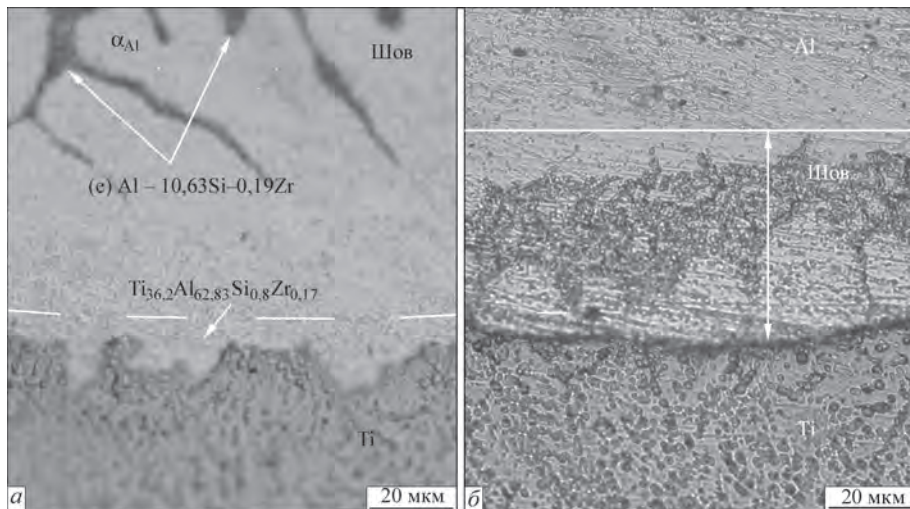


Рис. 6. Мікроструктура з'єднання Al/Ti, паяного припоєм Al–12Si і флюсом  $KAlF_4-10K_2SiF_6-5K_2ZrF_6$  (а), флюсом  $KAlF_4-10K_2SiF_6-5K_2ZrF_6$  без присаджування припою (б)

ного інтерметалідного шару (ІМШ) на титані товщиною  $\delta = 8 \dots 10$  мкм (рис. 4, а).

Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено, що вміст кремнію в  $\alpha$ -Al тв. р. становить (0,54 %), а в евтектичній складовій ( $\square 12,8$  %) при застосуванні припою Al–Si і реактивного флюсу  $KAlF_4-10K_2SiF_6$ . Інтерметалідний шар на титані утворений сполукою  $Ti_{37,24}Al_{61,5}Si_{1,26}$ , яка за стехіометричним складом [20] близька до фази  $TiAl_3$  (37,2 % Ti), що містить незначну концентрацію кремнію.

В з'єднаннях, сформованих при застосуванні реактивного флюсу без присаджування припою (рис. 4, б), формується значно менша кількість евтектичної складової в тонких міждендритних

проміжках  $\alpha$ -Al і спостерігається зменшення товщини інтерметалідного шару до  $\delta \leq 3$  мкм.

При застосуванні припою Al–12Si і реактивного флюсу  $KAlF_4-10K_2SiF_6-2CoF_2$  вміст кремнію в твердому розчині ( $\alpha$ -Al) та в евтектичній складовій майже не змінюється (рис. 5 а, табл. 2).

Вміст кобальту (0,10 мас. %) в евтектиці не впливає на розмір дендритів твердого розчину на основі алюмінію.

При застосуванні припою Al–12Si і реактивного флюсу  $KAlF_4-10K_2SiF_6-5K_2ZrF_6$ , який вміщує калій–цирконій фторид  $K_2ZrF_6$ , концентрація кремнію в  $\alpha$ -Al тв. р. залишається на тому ж рівні, а в евтектичній складовій знижується до 10,63 мас. % (рис. 6, а, табл. 3).

Таблиця 2. Вміст хімічних елементів в паяному з'єднанні Al/Ti, мас. %

Складова	Al	Si	Co	Ti
$\alpha$ -Al тв. р.	99,46	0,53	0,01	0
(е)	87,9	12,0	0,10	0
ІМШ (Ti)	61,52	0,9	0,08	37,5

Таблиця 3. Вміст хімічних елементів в паяному з'єднанні Al/Ti, мас. %

Складова	Al	Si	Zr	Ti
$\alpha$ -Al тв. р.	98,84	0,56	0,16	0
(е)	89,18	10,63	0,19	0
ІМШ (Ti)	62,83	0,8	0,17	36,2

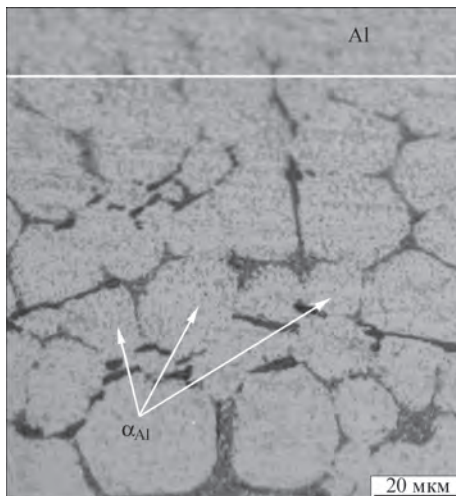


Рис. 7. Мікроструктура ділянки шва з'єднання Al/Ti, паяного припоєм Al-12Si і флюсом  $\text{KAlF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6-5\text{K}_2\text{ZrF}_6$

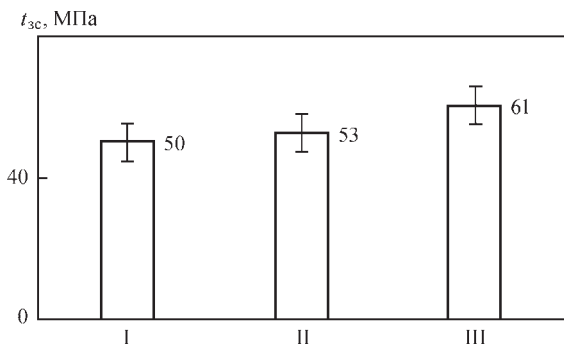


Рис. 8. Міцність насувного з'єднання Al/Ti, паяного припоєм Al-12Si з застосуванням реактивних флюсів:  $\text{KAlF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6$  (I),  $\text{KAlF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6-2\text{CoF}_2$  (II),  $\text{KAlF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6-5\text{K}_2\text{ZrF}_6$  (III)

Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу показали, що при застосуванні флюсу  $\text{KAlF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6-5\text{K}_2\text{ZrF}_6$ , який містить калій-цирконій фторид (IV) ( $\text{K}_2\text{ZrF}_6$ ), в евтектичній складовій знаходиться 0,19 мас. % Zr (табл. 3). Крім того, спостерігається певне подрібнення дендритів твердого розчину на основі алюмінію (рис. 7).

Такий же ефект подрібнення мікроструктури спостерігається при легуванні цирконієм (0...0,5 мас. %) евтектичного сплаву системи Al-12,4Si [33]. На прикладі литого сплаву Al-12,4Si-0,2Zr показано збільшення до 12 об. % вмісту евтектичної фази при легуванні цирконієм литого алюмінієвого сплаву і, відповідно, зменшення об'єму  $\alpha\text{-Al}$ , що сприяє підвищенню міцності на розтяг до  $\sigma_b = 100$  МПа [33].

За результатами механічних випробувань встановлено, що при температурі 20 °C максимальна міцність насувного зразка Al/Ti становить  $\tau_{zc} = 61$  МПа при використанні припою Al-12 % Si та реактивного флюсу  $\text{KAlF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6-5\text{K}_2\text{ZrF}_6$  (рис. 8).

## Висновки

1. При паянні різнорідних з'єднань алюмінію АД1 з титаном ВТ1-0 припоєм Al-12Si застосування реактивного флюсу  $\text{KF}-\text{AlF}_3-10\text{K}_2\text{SiF}_6$

сприяє очищенню поверхні основних металів і формуванню якісного з'єднання (при температурі 605...610 °C в аргоні).

2. При реактивно-флюсовому ( $\text{KF}-\text{AlF}_3-10\text{K}_2\text{SiF}_6$ ) паянні різнорідних з'єднань алюмінію з титаном без присаджування припою на контактній поверхні алюмінію при температурі 585...610 °C в результаті відновлення алюмінієм кремнію з флюсу утворюється легкоплавкий сплав системи Al-Si, який самостійно виконує функцію припою.

3. При застосуванні припою Al-12Si і реактивного флюсу  $\text{KAlF}_4-10\text{K}_2\text{SiF}_6-5\text{K}_2\text{ZrF}_6$ , який містить калій-цирконій фторид (IV) ( $\text{K}_2\text{ZrF}_6$ ), спостерігається певне подрібнення структури (дендритів твердого розчину на основі алюмінію) паяного шва зі сторони алюмінію, що сприяє підвищенню міцності на зсув паяних з'єднань алюміній-титан.

## Список літератури/References

- Tomashchuk, I., Sallamand, P., Méasson, A. et al. (2017) Aluminum to titanium laser welding-brazing in V-shaped groove. *Journal of Materials Processing Technology*, 245 24–36. Doi:10.1016/j.jmatprotec.02.009
- Sahul, M., Sahul, M., Vyskoč, M. et al. (2017) Disk Laser Weld Brazing of AW5083 Aluminum Alloy with Titanium Grade 2. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(3), 1346–1357. Doi: 10.1007/s11665-017-2529-6
- Shelyagin, V.D., Bernatskiy, A.V., Berdnikova, O.M. et al. (2020) Effect of Technological Features of Laser Welding of Titanium–Aluminum Structures on the Microstructure Formation of Welded Joints. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 42(3), 363–379. Doi: 10.15407/mfint.42.03.0363
- Dal, M., Peyre, P. (2017) Multiphysics Simulation and Experimental Investigation of Aluminum Wettability on a Titanium Substrate for Laser Welding–Brazing Process. *Metals*, 7(6), 218–232. Doi:10.3390/met7060218
- Chen, Y., Chen, S., Li. (2010) Influence of interfacial reaction layer morphologies on crack initiation and propagation in Ti/Al joint by laser welding–brazing. *Materials and Design*, 31, 227–233. Doi: 10.1016/j.matdes.2009.06.029
- Zhou, X., Duan, J., Zhang, F., et al. (2019) The Study on Mechanical Strength of Titanium–Aluminum Dissimilar Butt Joints by Laser Welding–Brazing Process. *Materials*, 12, 712–728. Doi:10.3390/ma12050712
- Choi, J.-W., Liu, H., Fujii, H. (2018) Dissimilar friction stir welding of pure Ti and pure Al. *Materials Science & Engineering A*, 730, 168–176. Doi:10.1016/j.msea.2018.05.117
- Fall, A., Jahazia, M., Khodabandeh, A. (2016) Effect of process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir-welded Ti–6Al–4V joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5-8), 2919–2931, DOI: 10.1007/s00170-016-9527-y
- Yue, Y., Zhang, Z., Ji, S. (2018) Friction stir lap welding of 6061-T6 Al to Ti–6Al–4V using low rotating speed. *Ibid*, 96(5-8), 2285–2291. Doi:10.1007/s00170-018-1769-4.
- Zhou, X., Chen, Y., Li, S. (2018) Friction Stir Spot Welding–Brazing of Al and Hot-Dip Aluminized Ti Alloy with Zn Interlayer. *Metals*, 8, 922–935. Doi:10.3390/met8110922
- Takemoto, T., Nakamura, H., Okamoto, I. (1990) Strength of titanium joints brazed with aluminum filler metals. *Transactions of JWRI*, 19(1), 45–49.
- Sohn, W.H., Bong, H.H., Hong, S.H. (2003) Microstructure and bonding mechanism of Al/Ti bonded joint using Al–10Si–1Mg filler metal. *Material of Science Engineering*, A355, 231–240. Doi:10.1016/S0921-5093(03)00070-4
- Eckardt, T., Hanhold, B., Petrasek, D. (2012) Evaluating low-temperature brazing filler metals for joining titanium. *Welding J.*, 91(2), 45–50.



14. Khorunov, V.F., Voronov, V.V., Maksymova, S.V. (2012) Brazing of titanium alloys by using aluminium-base filler alloys. *Ibid*, **11**, 2–5.
15. Voronov, V.V. (2013) Development of the technology for brazing of titanium alloys using filler alloys based on the Al–Mg system. *Ibid*, **2**, 56–58
16. Basude, A., Kumar, A., Rajasingh G. et al. (2022) Dissimilar joining of Titanium alloy to Aluminium using Al–Si based filler alloy by vacuum brazing technique. *Proc. IMechE Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 0(0)1-14 Doi: 0.1177/14644207221081951
17. Leyens, C., Peters, M. (2003) *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
18. Shapiro, A.E., Flom, Y.A. (2007) Brazing of Titanium at Temperatures below 800 °C: Review and Prospective Applications. *DVS-Berichte*, 243, 254–267
19. Kaufman, J.G. (2008) *Parametric Analyses of High-Temperature Data for Aluminum Alloys*. Ohio, ASM International® Materials Park.
20. Mondolfo, L.F. (1976) *Aluminum Alloys: Structure and Properties*. London, UK, Butterworths and Co., Ltd.
21. Takemoto, T., Okamoto, I. (1988) Intermetallic compounds formed during brazing of titanium with aluminium filler metals. *Journal of Materials Science*, 23(4), 1301–1308.
22. Sujata, M., Bhargava, S., Sangal, S. (1997) On the formation of TiAl<sub>3</sub> during reaction between solid Ti and liquid Al. *Journal of Materials Science Letters*, 16, 1175–1178.
23. Ohnuma, I., Fujita, Y., Mitsui, H. (2000) Phase equilibria in the Ti–Al binary system. *Acta Materialia*, 48, 3113–3123.
24. Liu, S., Weitzer, F., Schuster, C. J. et al. (2008) On the reaction scheme and liquidus surface in the ternary system Al–Si–Ti. *International Journal of Materials Research (formerly Z. Metallkde.)* 99, 705–711.
25. Dezellusz, O., Gardiolaz, B., Andrieuxz, J. et al. (2014) On the Liquid/Solid Phase Equilibria in the Al–Rich Corner of the Al–Si–Ti Ternary System. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 35(2), 137–145. Doi: 10.1007/s11669-014-0282-1
26. (1979) *Aluminum Brazing Handbook. Third Edition*. New Washington, Aluminium Association.
27. Winiowski, A., Majewski, D. (2017) Brazing of Titanium with Aluminium Alloys. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(2), 763–770.
28. Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. (2013) *Brazing of Aluminium and Aluminium to Steel*. Ch. 9. ed. By Dušan P. Seculić. Advances in Brazing. Science Technology and Applications/Oxford-Cambridge Woodhead Publishing, England.
29. Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. (2009) Reactive-Flux Brazing of Aluminium to Steel. *Welding & Material Testing*, **4**, 46–50.
30. Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. (2013) Flux Arc Brazing of Aluminium to Galvanised Steel. *The Paton Welding J.*, **2**, 31–36.
31. Sabadash, O.M., Maksymova, S.V. (2020) Formation and Structure of Al–Si Layer on Contact Surface of Aluminium–Reactive Flux of KF–AlF<sub>3</sub>–K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> System. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 42, (8) 1079–1092 (in Ukrainian). Doi: 10.15407/mfint.42.08.1079
32. Rocher, J.P., Quenisset, J.M., Naslain, R. (1989) Wetting improvement of carbon or silicon carbide by aluminium alloys based on a K<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub> surface treatment: application to composite material casting. *Journal of Materials Science*, 24 (8), 2697–2703. Doi:10.1007/bf02385613
33. Biswas, P., Patra, S., Kumar Mondal, M. (2020) Structure-property correlation of eutectic Al–12.4Si alloys with and without Zirconium (Zr) addition. *International Journal of Cast Metals Research*, 33(2-3), 134–145. Doi:10.1080/13640461.2020.1769319

## REACTIVE-FLUX BRAZING OF ALUMINIUM TO TITANIUM

O.M. Sabadash, S.V. Maksymova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

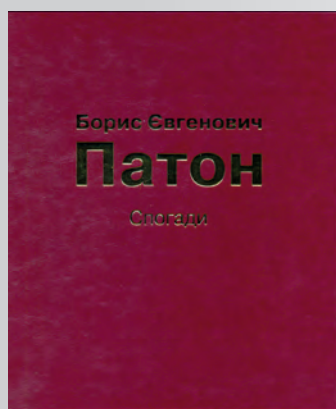
At brazing dissimilar joints of AD1 aluminium to VT1-0 titanium at the temperature of 605...610 °C by Al–12Si brazing filler metal in argon application of reactive flux of KAlF<sub>4</sub>–10K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> system with additives of CoF<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub> compounds, promotes production of a sound joint due to formation of a low-melting alloy of Al–Si system on the contact surface. The low-melting alloy of Al–Si system newly-formed at reactive-flux brazing can independently fulfill the function of brazing filler metal at formation of a dissimilar metal joint. Cobalt reduced from the flux has little influence on weld structure and joint strength. At application of Al–12Si brazing filler metal and reactive flux of KAlF<sub>4</sub>–10K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>–5K<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub> system, which contains potassium-zirconium fluoride (K<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub>), a certain refinement of the structure (dendrites of aluminium-based solid solution) is observed from the aluminium side that promotes an improvement of shear strength of aluminium-titanium brazed joints. 33 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

*Keywords:* aluminium, titanium, reactive-flux brazing, Al–Si brazing filler metal, reactive flux of KF–AlF<sub>3</sub>–K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> system, brazed joint

Надійшла до редакції 04.07.2022

### НОВА КНИГА

**Борис Євгенович Патон.** Спогади Київ: «Горобець», 2022. – 236 с., іл. ISBN 978-966-2377-69-9



Книга присвячена видатному ученому ХХ-ХХІ століття – академіку Борису Євгеновичу Патону. Життя цього геніального ученого і чудової, непересічної людини вмістило великі наукові відкриття в галузі матеріалознавства, металургії, зварювання та споріднених технологій, їх блискучу реалізацію в інтересах економіки і оборони країни, новаторські звершення в галузі організації науки і освіти.

Основу книги складають рукописи академіка Б.Є. Патона: записки, листи, матеріали до книг про видатних учених – його колег і друзів. Другий розділ книги містить спогади співробітників Інституту електрозварювання, які мали велику честь працювати разом з цією видатною Людиною.

*Книгу можна замовити в редакції журналу.*