METALLIC SURFACES AND FILMS

PACS numbers: 61.20.Qg, 61.25.Mv, 61.66.Fn, 81.15.Lm, 82.45.Mp

Формування та структура шару Al–Si на контактній поверхні алюміній–реактивний флюс системи KF–AlF₃–K₂SiF₆

О. М. Сабадаш, С. В. Максимова

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

При нагріванні реактивного флюсу системи KF–AlF₃–K₂SiF₆ на алюмінієвій підкладці відбуваються два процеси: відновлення силіцію зі складу гексафторсилікату калію; контактено-реактивне топлення силіцію з алюмінієм. У результаті на реакційній поверхні формується шар зі стопу Al–Si, склад якого близький до заевтектичного, що підтверджено результатами мікрорентгеноспектрального аналізу. Мікроструктура закристалізованого металічного шару Al–Si містить зерна твердого розчину на основі Алюмінію і заевтектичну складову з концентрацією Силіцію (% мас.): 17,18 у міжзеренних ділянках, а також окремі дискретні вкраплення пластівчастої фази, що за стехіометричним складом близька до сполуки FeSiAl₅. Проведені порівняльні експерименти на графітовій підкладці показали, що вміст Силіцію у залишках флюсу після нагрівання відповідає його вмісту у вихідному складі флюсу.

Ключові слова: реактивний флюс системи KF–AlF₃–K₂SiF₆, контактне топлення, Силіцій, Алюміній, металічний шар Al–Si.

When heating the reactive flux of the KF–AlF₃–K₂SiF₆ system on an aluminium substrate, two processes occur; reduction of silicon from potassium hexafluorosilicate; contact-reactive melting of silicon with aluminium. As a result, an Al–Si alloy layer is formed on the reaction surface, the composition

---

Corresponding author: Oleh Mykhaylovych Sabadash
E-mail: olegsab@ukr.net

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: O. M. Sabadash and S. V. Maksymova, Formation and Structure of Al–Si Layer on Contact Surface of Aluminium–Reactive Flux of KF–AlF₃–K₂SiF₆ System, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No. 8: 1079–1092 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.08.1079](https://doi.org/10.15407/mfint.42.08.1079).

of which is close to hypereutectic, which is confirmed by the results of X-ray microanalysis. The microstructure of the crystallized Al–Si metal layer contains aluminium-based solid solution grains and a hypereutectic component with a silicon concentration (% wt.): 17.18 in intercrystalline areas, as well as individual discrete inclusions of the lamellar phase, which is close in stoichiometric composition to the compound FeSiAl_5 . Comparative experiments on a graphite substrate showed that the silicon content in the flux residues after heating corresponds to its content in the initial flux composition.

Key words: reactive flux of the $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$ system, contact melting, silicon, aluminium, Al–Si metal layer.

(Отримано 2 серпня 2019 р.; остаточн. варіант — 7 травня 2020 р.)

1. ВСТУП

Алюміній є найпоширенішим металом у земній корі, і, природно, споживання його зростає з кожним роком. Згідно з цим створюють способи з'єднання стопів на основі Алюмінію. Труднощі з цього погляду пов'язані з наявністю на поверхні алюмінію суцільного тугоплавкого шару оксиду Al_2O_3 [1], який необхідно видаляти для створення міцного з'єднання. При зварюванні алюмінієвих стопів ця складна проблема руйнування шару оксиду алюмінію вирішується за рахунок розробки способів ведення процесів на змінному струмі [2], а при лютуванні — за рахунок застосування парів Магнію у вакуумі [3] або хімічно активних сольових розтопів флюсів [4]. Останнім часом у світовій практиці спостерігається тенденція відходу від методів вакуумного лютування як дорогого і малопродуктивного процесу і перехід до флюсового лютування у захисній атмосфері. При цьому корозійно-активні хлоридно-фторидні флюси заміщують негігроскопічними фторидними флюсами, залишки яких малорозчинні у воді і не є осередками корозії. Суттєву зміну (переворот) у виробництві автомобільних радіаторів зробив нереактивний флюс NOCLOK фірми «SOLVAY» (евтектика KF–AlF_3), на базі якого розроблено повний цикл виробництва алюмінієвих радіаторів, включно з їх лютуванням у перехідних печах в атмосфері азоту високої чистоти [5]. Слід зазначити, що нереактивний флюс NOCLOK реагує тільки з шаром оксиду алюмінію (Al_2O_3), тому для одержання злютованого з'єднання необхідно використовувати лютець. Це питання вирішували за рахунок використання заготовок (злютованих листів, пресованих напівфабрикатів), поверхня яких покрита тонким шаром лютця Al–Si, що підвищує вартість скінченної продукції.

За високої температури лютування ($T = 600\text{--}610^\circ\text{C}$) в злютованих листах має місце інтенсивна твердотільна дифузія Si з покриття (стоп Al–Si) до основного матеріалу [6]. Зміна вмісту Силіцію у пок-

ритті призводить до підвищення температури ліквідусу рідкої фази і зменшення її кількості у злитому прозорі [7]. За складом нерозтоплений метал з покриття, що залишився на поверхні після лютування, є переважно твердим розчином [8]. Тому для формування якісного злитого з'єднання з алюмінію потрібно контролювати кількість розтопленого лютця на поверхні і в прозорі, надлишок якого може призвести до ерозії та неочікуваних деформацій, особливо, тонкостінних елементів.

Математичні дослідження для умов лютування в печі [9] дозволяють оцінити твердотільну дифузію Силіцію з розтопленого покриття в основний метал простою 1D чисельною моделлю. Також, запропоновано спрощену математичну модель формування таврового з'єднання при лютуванні стопу Al–Mn лютцем Al–Si за температури, нижчої на 50°C за температуру солідусу основного металу [10]. Визначено залежність (наближену) між площею розчинення алюмінієвого стопу, товщиною плакованого шару, і вихідним складом лютця, що створює можливість порівнювати попередні дослідження, які були розглянуті іншими авторами [11, 12].

Іншим напрямом у технології лютування алюмінієвих виробів є використання негігроскопічного реактивного флюсу, який активно очищає поверхню (руйнує оксидний шар) і утворює легкотопкий стоп, зокрема, лютець Al–Si.

Було запропоновано, наприклад, реактивний флюс NOCOLOK®-SiI Flux [13], який містить дрібнодисперсні частинки Силіцію. Однак, через невисоку ефективність він не знайшов широкого застосування.

Відомі способи лютування Алюмінію за температури 600–620°C без присаджування лютця із застосуванням реактивних флюсів на основі сумішей негігроскопічних фтороалюмінатів калію KAlF_4 та K_2AlF_5 з додаванням 6–50% мас. K_2SiF_6 [14] або 2–98% мас. фторсилікатів (K_2SiF_6 , Rb_2SiF_6 , Cs_2SiF_6) і 2–98% мас. фторсилікату алюмінію [15]. Однак фазові рівноваги та фізико-хімічні властивості розтопів фторидних сумішей з цими сполуками ще мало вивчені.

Розроблений нами негігроскопічний реактивний флюс сольової системи $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$, який при лютуванні zdeформованих алюмінієвих стопів з низьким вмістом Магнію забезпечує максимальний об'єм утвореного рідкого стопу Al–Si, що дає змогу проводити лютування без обов'язкового присаджування лютця [16].

У даній роботі представлено результати досліджень структури закристалізованого поверхневого шару Al–Si, сформованого порошковими флюсами сольової системи $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$ в температурно-часових режимах, що визначені для високотемпературного лютування Алюмінію та його стопів.

Раніше проведені нами дослідження топкості і хімічної взаємодії у сольовій системі K, Al, Si /F [17] показали, що термостійкі сольові

суміші обмежуються трикутником $\text{KF}-\text{K}_3\text{AlF}_6-\text{K}_3\text{SiF}_7$. У потрібній системі $\text{KF}-\text{AlF}_3-\text{K}_2\text{SiF}_6$ будь-які суміші, що мають надлишок щодо стехіометрії фториду алюмінію термічно нестійкі. При високих температурах за рахунок розкладання фтористим алюмінієм (AlF_3) комплексного фториду (K_2SiF_6), сольові розтопи можуть виділяти токсичний SiF_4 у газову фазу. Згідно результатів досліджень [18, 19] комплексні фториди калію K_3SiF_7 та K_2SiF_6 термічно стабільні при нагріванні в інтервалі температур $T = 590-630^\circ\text{C}$. Гексафторсилікат калію (K_2SiF_6) виготовляють у промислових масштабах [20], неігроскопічний і технологічно перспективніший для виготовлення композицій реактивних флюсів для лютування Алюмінію.

Дослідження [21], проведені з використанням реактивних флюсів сольової системи $\text{KF}-\text{AlF}_3-\text{K}_2\text{SiF}_6$ показали, що в інтервалі температур $580-630^\circ\text{C}$ сольові розтопи змочують і швидко розчиняють поверхневий шар оксиду Al_2O_3 . При контакті з Алюмінієм відбувається відновлення Силіцію зі складу кремнефториду калію та утворення на поверхні тонкого рідкого шару, що за складом близький до евтектики $\text{Al}-12\text{Si}$. Це істотно покращує змочування Алюмінію (контактний кут становить $4-22^\circ$) лютцями системи $\text{Al}-\text{Si}$, розтікання і заповнення лютівних прозорів, а також робить можливим лютування без присаджування лютця.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для проведення експериментів використовували підкладки з алюмінієвого ступу марки АД1 (табл. 1), графіту марки МПГ-7 [23] і реактивного флюсу сольової системи $\text{KF}-\text{AlF}_3-\text{K}_2\text{SiF}_6$.

Реактивний флюс являє собою суміш з гексафторсилікату калію та фторалюмінатів калію, доведену механічним змішуванням до рівномірного розподілення частинок компонентів в усьому об'ємі дисперсного середовища.

Суміш фторалюмінатів калію одержували шляхом топлення безводних фторидів калію і алюмінію в захисній атмосфері аргону. Легкотопка суміш з фторалюмінатів калію вміщує тетрафторалюмінат калію (KAlF_4) як основу з невеликою кількістю гексафторалюмінату калію (K_3AlF_6), що у масовому співвідношенні близька до складу евтектики E_2 [24] сольової системи $\text{KF}-\text{AlF}_3$ і має темпера-

ТАБЛИЦЯ 1. Хімічний склад у % мас. алюмінієвого ступу АД1 [22].

TABLE 1. The chemical composition in % wt. aluminium alloy AD1.

Марка	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	Al
АД1	0,15	0,30	0,05	0,025	0,05	0,05	0,15	0,1	min 99,3

ТАБЛИЦЯ 2. Склад реактивного флюсу сольової системи $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$.

TABLE 2. The composition of the reactive flux of salt system $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$.

№ зразка	Склад флюсу, % мас.	
	Гексафторсилікат калію (K_2SiF_6)	Суміш фторалюмінатів калію (KAlF_4 , K_3AlF_6)
1	3	97
2	5	95
3	7	93
4	10	90

туру топлення 558–575°C.

Наявність фаз синтезованих сполук KAlF_4 , K_3AlF_6 доведена рентгенофазовим аналізом порошків з використанням дифрактометра ДРОН-УМ1 (CuK_α , $U = 25$ кВ, $I = 25$ мА, крокове сканування 0,05°, час сканування в точці 7 с, монохроматор монокристал графіту, програма POWDER CELL 2/4).

Зразки для досліджень одержано шляхом формування шару зі стопу системи Al–Si на контактній межі сольовий розтоп «флюс $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$ » — алюмінієва підкладка (стоп АД1) у результаті відновлення Силіцію зі складу гексафторсилікату калію та його взаємодії з Алюмінієм при нагріванні.

На поверхню підкладок розміром 10×10×0,5 мм з алюмінію (після хімічного очищення у водних розчинах: 15% лугу NaOH для знежирення; 20% об. HNO_3 2% об. HF для щавлення) та графіту марки МПГ-7 наносили шар флюсу з різним вмістом 3–10% мас. гексафторсилікату калію (табл. 2). Маса флюсу в наважці становила 0,01 г. Як допоміжну речовину для нанесення флюсу використовували розчин, що містить 1% об. гліцерину і 99% об. дистильованої води. Видалення вологи з наважки флюсу здійснювали при сублімаційному висушуванні за температури 200–260°C.

Нагрівання зразків з флюсом проводили на лабораторному обладнанні з використанням системи автоматичного контролю і запису температурно-часових параметрів за температури підкладки (605±3)°C, яка є оптимальною для лютування zdeформованих алюмінієвих стопів з низьким вмістом Магнію, та витримці не більше 120 с в атмосфері аргону високої чистоти зі швидкістю нагрівання 35–40°C/с.

Дослідження мікроструктури, вміст і розподіл елементів на поверхні залишків флюсу та у сформованих металевих шарах проводили із застосуванням растрової електронної мікроскопії (SEM) на приладі CamScan-4 (Англія), який оснащений енергодисперсійним

аналізатором ENERGY 200 з програмним забезпеченням INCA.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Порівняння вмісту елементів у поверхневому шарі залишків флюсу після нагрівання дає можливість визначити повноту проходження основних процесів: 1) відновлення зі складу K_2SiF_6 Силіцію, що утворює стоп Al–Si на контактній поверхні алюмінієвої підкладки; 2) термічного розкладу K_2SiF_6 з переходом SiF_4 в газову фазу на «нереактивній» графітовій підкладці.

Результати мікрорентгеноспектральних досліджень поверхні закристалізованого солявого розтопу (залишків реактивного флюсу) зображено на рис. 1–4.

Поверхня залишків флюсу, що одержана на алюмінієвій підкладці відрізняється від такої, яка отримана на графітовій підкладці (рис. 1, а, б). Це вказує на різний характер хімічної взаємодії соляного розтопу з матеріалом підкладки.

Слід зазначити, що показник вмісту елементів локального мікрорентгеноспектрального аналізу рельєфної поверхні зразків із залишками флюсу визначали як середній за 7–9 вимірів.

У процесі нагрівання соловий розтоп добре змочує поверхню підкладки і затікає на зворотну сторону. З'ясовано, що на алюмінієвій підкладці спостерігається зональна кристалізація залишків флюсу (рис. 2, а–в). Що може бути пов'язано з реакцією відновлен-

Рис. 1. Макроструктура залишків флюсу $KF-AlF_3-10K_2SiF_6$ на алюмінієвій (а) і графітовій (б) підкладках.

Fig. 1. Macrostructure of $KF-AlF_3-10K_2SiF_6$ flux residues on aluminium (a) and graphite (b) substrates.

Рис. 2. Мікроструктура залишків флюсу $\text{KF-AlF}_3\text{-}10\text{K}_2\text{SiF}_6$ на алюмінієвій підкладці в трьох ділянках: центральній (а) і периферійній (б, в).

Fig. 2. Microstructure of $\text{KF-AlF}_3\text{-}10\text{K}_2\text{SiF}_6$ flux residues on aluminium substrate in three sections: central (a) and peripheral (b, c).

ня Силіцію зі складу гексафторсилікату калію.

З метою вивчення особливостей протікання фізико-хімічних процесів визначали вміст (% мас.) елементів методом мікрорентгеноспектрального аналізу та перераховували у екв. % (% E формула (1)) згідно закону еквівалентів за рекомендаціями [25]:

$$\%E = \left(\frac{P_E \times Z_E / A_E}{3P_{\text{Al}} / A_{\text{Al}} + 4P_{\text{Si}} / A_{\text{Si}} + P_{\text{K}} / A_{\text{K}}} \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

де P_E (% мас.) згідно з результатами мікрорентгеноспектрального аналізу, A_E — атомні маси елементів, Z_E — числа еквівалентності, які дорівнюють 1 для Калію (К) і Фтору (F), 2 — для Оксигену (O), 3 — для Al і 4 — для Si. Карбон у розрахунках не враховували, оскільки передбачалося, що він знаходиться у вільному стані.

Рис. 3. Вміст Силіцію у залишках реактивних флюсів № 1 (а) і № 2 (б) на алюмінієвій і графітовій підкладках у порівнянні з вихідним станом.

Fig. 3. The content of silicon in the residues reactive fluxes No. 1 (a) and No. 2 (b) on aluminium and graphite substrates compared with the original state.

Зміна вмісту Алюмінію і Силіцію для зразків флюсів (табл. 2) за даними мікрорентгеноспектрального аналізу показано на рис. 3 та рис. 4. Встановлено, що реакція розкладання K_2SiF_6 з виділенням Силіцію у вигляді леткого газу SiF_4 не встигає відбутися в умовах нагрівання. Про це свідчить значний вміст Силіцію у залишках флюсу на графітовій підкладці, який близький до його початкового вмісту у флюсі (рис. 4). Відповідно встановлено практично нульовий вміст Силіцію у поверхневих залишках флюсу на алюмінієвій підкладці (рис 4, *a*), що вказує на його участь в утворенні стопу Al–Si у результаті проходження процесу відновлення Силіцію зі складу K_2SiF_6 на реакційній поверхні алюмінію.

Загалом результати елементного аналізу вказують на декілька аспектів. По-перше, на алюмінієвій підкладці практично відсутній Оксиген, а отже, можна вважати, що ці зразки являють собою суміш фторидів. Наявність незначних кількостей Оксигену може бути пов'язано з можливим утворенням оксифторидів змінного складу. По-друге, вміст Алюмінію у зразках, одержаних на алюмінієвій підкладці, завжди вищий, ніж у вихідному стані. По-третє, у всіх зразках на графітових підкладках співвідношення Фтор/катиони істотно перевищує 1 і присутній Карбон.

Як було встановлено [21], після нагрівання у реакційній зоні алюмінієвого зразка формуються два шари (рис. 5): верхній (світлий) — залишки реактивного флюсу у вигляді сольової суміші фторидів; нижній (темний) — закристалізований шар з алюмінієво-кремнієвого стопу.

Особливість лютування реактивними флюсами сольової системи $KF-AlF_3-K_2SiF_6$ полягає в тому, що при взаємодії розтопу флюсу з Алюмінієм за дуже короткий час на міжфазній границі «сольовий

Рис. 4. Вміст Алюмінію в залишках реактивних флюсів № 1 (*a*) і № 2 (*б*) на алюмінієвій і графітовій підкладках у порівнянні з вихідним станом.

Fig. 4. The content of aluminium in the residues reactive fluxes No. 1 (*a*) and No. 2 (*b*) on aluminium and graphite substrates compared with the original state.

розтоп–алюміній» зі складу гексафторсилікату калію відновлюється значна кількість Силіцію (реакція 2), яка достатня для утворення рідкого поверхневого шару при контактному топленні компонентів з обмеженою розчинністю у твердому стані, що утворюють евтектичну систему (реакція 3):

де (SiF) зв'язаний вказує на стан, в якому перебуває Силіцій до його відновлення.

На рисунках 6, а, б показано мікроструктуру алюмінієвої підкладки (поперечний переріз), яка містить залишки флюсу системи $\text{KF}-\text{AlF}_3-\text{K}_2\text{SiF}_6$ і сформований металічний шар на алюмінієвому стопі АД1. Структура металічного шару містить зерна твердого роз-

Рис. 5. Мікроструктура зразка алюмінієвого стопу 1050 (аналог стопу АД1) після розтікання реактивного флюсу сольової системи $\text{KF}-\text{AlF}_3-\text{K}_2\text{SiF}_6$: кінцева (а), середня (б), початкова ділянки (в) [21].

Fig. 5. Microstructure of aluminium alloy 1050 sample (analogue of AD1 alloy) after spreading of reactive flux of $\text{KF}-\text{AlF}_3-\text{K}_2\text{SiF}_6$ salt system: ending (a), medium (b), initial sections (c) [21].

чину на основі Алюмінію, заевтектичну складову, в якій присутні окремі пластівчасті вкраплення інтерметалідної фази (рис. 6, б).

Мікрорентгеноспектральними дослідженнями встановлена значна неоднорідність розподілу Силіцію в мікрооб'ємах різних ділянок закристалізованого металевго шару. У зернах твердого розчину на основі Алюмінію Силіцій присутній в незначній кількості і знаходиться в межах 1,11–1,26% мас., що не перевищує його максимальну розчинність за рівноважних умов кристалізації 1,65% мас. в системі Алюміній–Силіцій [26].

У міжзеренних ділянках концентрація Силіцію складає 17,18% мас. В даних ділянках виявлено окремі вкраплення пластівчастої фази на основі Алюмінію, що містять 11,3% Заліза і 24,8% Силіцію, що за стехіометричним складом близька до сполуки FeSiAl_5 [26]. Такі мікроструктурні особливості поверхневого алюмінієво-кремнієвого шару в зоні контактного топлення з повним переходом у рідкий стан можливі за сталої температури і за евтектичного співвідношення їхніх мас. Таким чином, у нерівноважних умовах і у встановленому температурному інтервалі (вище температури 577°C утворення евтектики $\text{Al}-12,5\text{Si}$) на реакційній поверхні зразків алюмінію здійснювалося контактне топлення з утворенням металічного шару. Після кристалізації формується мікроструктура із зе-

Рис. 6. Поперечний переріз алюмінієвої підкладки (а) та мікроструктура сформованого металевго шару $\text{Al}-\text{Si}$ (б) після хімічної взаємодії з реактивним флюсом сольової системи $\text{KF}-\text{AlF}_3-\text{K}_2\text{SiF}_6$.

Fig. 6. Cross-section of the aluminium substrate (a) and the microstructure of the formed metal layer $\text{Al}-\text{Si}$ (b) after chemical interaction with the reactive flux of the salt system $\text{KF}-\text{AlF}_3-\text{K}_2\text{SiF}_6$.

рен твердого розчину на основі Алюмінію з тонкими виділеннями псевдоевтектики Al–Si пластівчастого типу. Встановлено, що збільшений вміст гексафторсилікату калію у складі реактивного флюсу призводить до приросту товщини алюмінієво-кремнієвого шару на алюмінієвій підкладці.

Високий вміст Силіцію в міжзеренних ділянках твердого розчину на основі Алюмінію вказує на те, що при нагріванні в евтектичній області (вище температури утворення евтектики Al–Si) можливим є утворення рідкого шару зі стопу Al–Si, склад якого близький до заевтектичного. Окрім того, проведені дослідження показали, що при формуванні поверхневого шару Al–Si у міжзеренних ділянках твердого розчину на основі Алюмінію окрім заевтектичної складової виявлена пластівчаста фаза $\text{Fe}_{11,3}\text{Si}_{24,8}\text{Al}_{63,9}$. Пояснити це можна кристалізацією металу у нерівноважних умовах і за наявності концентраційного градієнта по Феруму і Силіцію, що призводить до протікання активних дифузійних процесів і формування даної фази. Таке формування структури поверхневого шару зі стопу системи Al–Si спостерігається на максимальній відстані від умовної поверхні зразка, що не перевищує 100 мкм.

4. ВИСНОВКИ

Проведені дослідження взаємодії реактивного флюсу сольової системи $\text{KF–AlF}_3\text{–K}_2\text{SiF}_6$ на алюмінієвій (реакційній) і графітовій (нейтральній) підкладках за температури $605 \pm 3^\circ\text{C}$ (що вище температури утворення подвійної евтектики Al–Si) в атмосфері аргону високої чистоти показали, що на поверхні алюмінію відбуваються два процеси: відновлення Силіцію зі складу гексафториду калію і контактно-реактивне топлення Силіцію з Алюмінієм. У результаті такої взаємодії формується металічний шар системи Al–Si, склад якого близький до заевтектичного, що підтверджено результатами мікрорентгеноспектрального аналізу. У залишках флюсу на графітовій підкладці визначено, що вміст складових хімічних елементів, зокрема Силіцію, майже не змінюється і відповідає їх вмісту у вихідному складі флюсу.

Відповідно практично нульовий вміст Силіцію в залишках флюсу на алюмінієвій підкладці, що вказує на його участь в утворенні тонкого поверхневого шару зі стопу Al–Si при контактному евтектичному топленні на реакційній поверхні алюмінію. Також можна стверджувати, що реакція розкладання K_2SiF_6 з виділенням Силіцію у вигляді леткого газу SiF_4 не встигає відбутися при даних температурно-часових режимах нагрівання.

Мікроструктура закристалізованого металічного шару Al–Si містить зерна твердого розчину на основі Алюмінію, заевтектичну складову з концентрацією Силіцію 17,18% мас., а також окремі

дискретні вкраплення пластівчастої фази $\text{Fe}_{11,3}\text{Si}_{24,8}\text{Al}_{63,9}$, яка за стехіометричним складом близька до сполуки FeSiAl_5 .

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Г. В. Самсонов, А. Л. Борисова, Т. Г. Жидкова, Т. Н. Зиатоківа, Ю. П. Ка-лошина, А. Ф. Киселева, П. С. Кислий, М. С. Ковальченко, Т. Я. Косолапо-ва, Я. С. Малахов, В. Я. Малахов, А. Д. Панасюк, В. И. Славута, Н. И. Тка-ченко, *Физико-химические свойства окислов* (Москва: Металлургия: 1978).
2. Д. М. Рабкин, В. Г. Игнатьев, И. В. Довбищенко, *Дуговая сварка алюминия и его сплавов* (Москва: Машиностроение: 1982).
3. С. В. Лашко, Н. В. Лашко, *Пайка металлов* (Москва: Машиностроение: 1988).
4. А. М. Никитинский, *Пайка алюминия и его сплавов* (Москва: Машиностро-ение: 1983).
5. *NOCOLOCK Flux Brazing Technology. Manual. Solvay Fluorund Derivate GmbH* (1997).
6. F. Gao, H. Zhao, Dusan P. Sekulic, Y. Qian, and L. Walker, *Mater. Sci. Eng. A*, **337**, Iss. 1–2: 228 (2002).
7. D. M. Turriffa, S. F. Corbina, and M. Kozdrasb, *Acta Mater.*, **58**, No. 4: 1332 (2010).
8. F. Gao, D. P. Sekulic, Y. Y. Qian, and J. G. Morris, *Mater. Sci. Technol.*, **20**, 577 (2004).
9. J. Lacaze, B. Jacques, T. Mazet, and M. Vynnycky, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **71**, No. 11: 2623 (2018).
10. M. Vynnycky and B. Jacques, *J. Eng. Math.*, **116**, No. 1: 73 (2019).
11. J. A. Warren, W. J Boettinger, and A. R. Roosen, *Acta Mater.*, **46**, No. 9: 3247 (1998).
12. T. J. Singler, S. Su, L. Yin, and B. T. Murray, *J. Mater. Sci.*, **47**: 8261 (2012).
13. R. S. Timsit and B. J. Janeway, *Weld. J.*, **73**, No. 6: 119 (1994).
14. T. Born and H.-J. Belt, *Solderless Aluminum Brazing*: Patent US 6,019,856 A, B23K 35/00 (01.02.2000).
15. А. В. Полторыбатько, Д. А. Шаклеин, В. Е. Задов, *Способ подготовки по-верхности алюминия и его сплавов для пайки*: Патент RU 2 324 578 C2, B23K 1/20, 103/10, C23C 22/34, C23G 1/02, 1/14 (2006.01) (27.11.2007).
16. О. М. Сабадаш, В. Ф. Хорунов, О. О. Андрійко, *Реактивний флюс для паян-ня алюмінію та його сплавів*: Патент UA 103963 C2 B23K 35/363 (2006.01) (10.12.2013).
17. О. О. Андрійко, Є. В. Панов, Б. В. Яковлев, В. Ф. Хорунов, О. М. Сабадаш, *Український хімічний журнал*, **63**, № 10: 121 (1997).
18. L. Kolditz, W. Wilde, and U. Bentrup, *Zeitschrift für Chemie*, **23**, No. 7: 246 (1983).
19. Ю. Л. Делимарський, О. Г. Голов, Р. И. Чернов, *Український хімічний жур-нал*, **35**, № 6: 563 (1969).
20. ТУ 6-09-1650-88 *Калий кремнефторид* (K_2SiF_6).
21. V. F. Khorunov and O. M. Sabadash, *Brazing of Aluminium and Aluminium to Steel: in Advances in Brazing* (Eds. D. P. Sekulic) (Oxford–Cambridge: WPL: 2013), p. 249.

22. ГОСТ 4784-97 Алюминий и алюминиевые сплавы деформированные. Марки.
23. ТУ 1915-109-081-2004. Графит мелкозернистый плотный. Заготовки и изделия.
24. Rong Chen, Genhua Wu, and Qiyun Zhang, *J. Am. Ceramic Society*, **83**, No. 12: 3196 (2000).
25. М. Е. Позин, Б. А. Копылев, Г. В. Бельниченко, Л. Я. Терещенко, И. И. Орехов, Б. А. Дмитриевский, В. В. Зубов, *Расчеты по технологии неорганических веществ* (Ленинград: Химия: 1977).
26. Л. Ф. Мондольфо, *Структура и свойства алюминиевых сплавов* (Москва: Металлургия: 1979).

REFERENCES

1. G. V. Samsonov, A. L. Borisova, T. G. Zhidkova, T. N. Ziatokova, Yu. P. Kaloshina, A. F. Kiseleva, P. S. Kislyiy, M. S. Kovalchenko, T. Ya. Kosolapova, Ya. S. Malahov, V. Ya. Malahov, A. D. Panasyuk, V. I. Slavuta, and N. I. Tkachenko, *Fiziko-Khimicheskie Svoystva Okislov* [Physical and Chemical Properties of Oxides] (Moscow: Metallurgiya: 1978) (in Russian).
2. D. M. Rabkin, V. G. Ignatev, and I. V. Dovbischenko, *Dugovaya Svarka Alyuminiya i Ego Splavov* [Arc Welding of Aluminium and Its Alloys] (Moscow: Mashinostroenie: 1982) (in Russian).
3. S. V. Lashko and N. F. Lashko, *Payka Metallov* [Brazing Metals] (Moscow: Mashinostroenie: 1988) (in Russian).
4. A. M. Nikitinskiy, *Payka Alyuminiya i Ego Splavov* [Brazing of Aluminium and Its Alloys] (Moscow: Mashinostroenie: 1983) (in Russian).
5. *NOCOLOK Flux Brazing Technology. Manual. Solvay Fluorund Derivate GmbH* (1997) (in German).
6. F. Gao, H. Zhao, Dusan P. Sekulic, Y. Qian, and L. Walker, *Mater. Sci. Eng. A*, **337**, Iss. 1–2: 228 (2002).
7. D. M. Turriff, S. F. Corbin, and M. Kozdras, *Acta Mater.*, **58**, No. 4: 1332 (2010).
8. F. Gao, D. P. Sekulic, Y. Y. Qian, and J. G. Morris, *Mater. Sci. Technol.*, **20**, 577 (2004).
9. J. Lacaze, B. Jacques, T. Mazet, and M. Vynnycky, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **71**, No. 11: 2623 (2018).
10. M. Vynnycky and J. Lacaze, *J. Eng. Math.*, **116**, No. 1: 73 (2019).
11. J. A. Warren, W. J. Boettinger, and A. R. Roosen, *Acta Mater.*, **46**, No. 9: 3247 (1998).
12. T. J. Singler, S. Su, L. Yin, and B. T. Murray, *J. Mater. Sci.*, **47**: 8261 (2012).
13. R. S. Timsit and B. J. Janeway, *Welding J.*, **73**, No. 6: 119 (1994).
14. T. Born and H.-J. Belt, *Solderless Aluminum Brazing*; Patent US 6,019,856 A, B23K 35/00 (01.02.2000).
15. A. V. Poltorybat'ko, D. A. Shaklein, and V. E. Zadov, *Sposob Podgotovki Poverkhnosti Alyuminiya i Ego Splavov dlya Payki*; Patent RU 2 324 578 C2, B23K 1/20, 103/10, C23C 22/34, C23G 1/02, 1/14 (2006.01) (27.11.2007) (in Russian).
16. O. M. Sabadash, V. F. Khorunov, and O. O. Andriyko, *Reaktyvnyy Flyus dlya*

- Payannya Alyuminiyu ta Yoho Splaviv*: Patent UA 103963 C2 B23K 35/363 (2006.01) (10.12.2013) (in Ukrainian).
17. A. A. Andriyko, E. V. Panov, B. V. Yakovliev, V. F. Khorunov, and O. M. Sabadash, *Ukrayinskyy Khimichnyy Zhurnal*, **63**, No. 10: 121 (1997) (in Ukrainian).
  18. L. Kolditz, W. Wilde, and U. Bentrup, *Zeitschrift für Chemie*, **23**, No. 7: 246 (1983) (in German).
  19. Yu. L. Delymarsky, O. H. Holov, and R. I. Chernov, *Ukrayinskyy Khimichnyy Zhurnal*, **35**, No. 6: 563 (1969) (in Ukrainian).
  20. *TU 6-09-1650-88 Kaliy Kremneftorid* (K_2SiF_6) [Potassium Silicofluoride] (in Russian).
  21. V. F. Khorunov and O. M. Sabadash, *Brazing of Aluminium and Aluminium to Steel: in Advances in Brazing* (Eds. D. P. Sekulić) (Oxford–Cambridge: WPL: 2013), p. 249.
  22. *GOST 4784-97 Alyuminiy i Alyuminievy Splyvy Deformirovannye. Marki* [Standard 4784-97 Aluminium and Wrought Aluminium Alloys. Grades] (in Russian).
  23. *TU 1915-109-081-2004. Grafit Melkozernistyy Plotnyy. Zagotovki i Izdeliya* [Graphite Fine Granular Dense. Blanks and Products] (in Russian).
  24. Rong Chen, Genhua Wu, and Qiyun Zhang, *J. Am. Ceramic Society*, **83**, No. 12: 3196 (2000).
  25. M. E. Pozin, B. A. Kopylov, G. V. Belnichenko, L. Y. Tereschenko, I. I. Orehov, B. A. Dmitrevskiy, and V. V. Zubov, *Raschety po Tekhnologii Neorganicheskikh Veshchestv* [Inorganic Matter Technology Calculations] (Leningrad: Khimiya: 1977) (in Russian).
  26. L. F. Mondolfo, *Struktura i Svoystva Alyuminievykh Splavov* [Aluminium Alloys: Structure and Properties] (Moscow: Metallurgiya: 1979) (in Russian).