

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА**

**САБАДАШ  
ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 621.791.37

**ТЕХНОЛОГІЯ РЕАКТИВНО-ФЛЮСОВОГО ПАЯННЯ ТОНКОСТІННИХ  
КОНСТРУКЦІЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ Al, Al-Mn**

Спеціальність 05.03.06 - «Зварювання та споріднені процеси і технології»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

**Київ – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Науковий керівник: доктор технічних наук, с.н.с.

**Максимова Світлана Василівна**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
м. Київ, завідувача відділу фізико-хімічних процесів паяння

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,

**Перемітько Валерій Вікторович**, декан металургійного факультету, професор кафедри технології та устаткування зварювання, Дніпровський державний технічний університет, Україна, м. Кам'янське

кандидат технічних наук, с.н.с.,

**Габ Іван Іванович**, провідний науковий співробітник відділу контактних явищ і паяння неметалевих матеріалів, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ.

Захист відбудеться **17** березня 2021 року о **10<sup>00</sup>** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.182.01, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ -150, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: Україна, 03150, МСП, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11

Автореферат розіслано **12** лютого **2021** р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д. 26.182.01  
кандидат технічних наук



Є.В. Шаповалов

**Актуальність теми.** Тонкостінні легкі конструкції (фазовані антенні решітки (ФАР)) з алюмінію і його сплавів Al-Mn знаходять широке застосування в приладобудуванні при виготовленні навігаційних приладів та систем управління.

Тонкостінні алюмінієві антени, як агрегат, це група окремих антен складної геометричної конфігурації, різноманітність яких визначається типом випромінювачів, що використовуються. Отримання фазованих антенних решіток з алюмінієвих сплавів шляхом паяння є найбільш надійною та інноваційною технологією, що забезпечує конструктивно-складним тонкостінним виробами можливість відтворення мікрохвильових характеристик з більшою точністю. До фазованих антенних решіток висуваються жорсткі технічні вимоги з якості множинних паяних швів (протяжністю більше 1000 мм), їх повторюваності в процесі виготовлення, що визначає надійність тонкостінних алюмінієвих конструкцій в цілому.

Відома технологія паяння тонкостінних конструкцій (ФАР) шляхом занурення в сольовий розплав корозійних хлоридно-фторидних флюсів має низку недоліків, які пов'язані з наступними особливостями: – значними витратами електроенергії на підігрів в електротермічній печі (споживча потужність сольової ванни складає 600-800 КВт/год.); – порушенням хімічного складу рідкого флюсу внаслідок випаровування ( $T=620$  °C) хімічних сполук і підвищенням вмісту оксифторидів алюмінію, які негативно впливають на якість паяних з'єднань; – забрудненням атмосфери токсичними хімічними сполуками; значними витратами флюсу (маса ванни 1300-1500 кг) після паяння алюмінієвого сплаву загальною площею 1000 м<sup>2</sup>, об'ємів гарячої (60-90 °C) і холодної води на протязі тривалого часу (5-6 годин); видаленням корозійних залишків флюсів; необхідністю очищення водних стоків від токсичних сполук; утилізацією флюсу, що пов'язано зі значними матеріальними і трудовими затратами.

Вирішальним фактором при серійному виробництві ФАР є доцільність забезпечення експлуатаційних характеристик, сучасних вимог до екологічної безпеки та мінімізація собівартості виробу.

В зв'язку з цим необхідно розробити та застосувати корозійно-неактивні флюси та технології реактивно-флюсового паяння в контрольованому середовищі захисних газів (азот, аргон), які забезпечать стабільну якість паяним з'єднанням алюмінієвих багатоелементних виробів, екологічну безпеку, зниження собівартості виробу та можуть бути реалізовані на новітньому технологічному устаткуванні в промислових умовах.

Особливо важливе значення набуває технологія реактивно-флюсового паяння алюмінію та його сплавів без обов'язкового додавання припоїв при одержанні паяних з'єднань з вузькими зазорами і тонкими (товщиною 100 мкм і більше) елементами конструкції.

Це обумовлює актуальність дослідження фізико-хімічних процесів при взаємодії корозійно-неактивних флюсів з основним металом в умовах нагріву та розробки технології реактивно-флюсового паяння алюмінієвих тонкостінних багатоелементних конструкцій зі складними замкнутими профілями.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в межах державних науково-технічних програм: «Розробка композиційних припоїв, дослідження структури та фазових перетворень в припійних матеріалах та паяних з'єднаннях, розробка технологічних процесів паяння жароміцних нікелевих сплавів, алюмінієвих сплавів між собою та зі сталлю»; (номер держреєстрації № 0100U004946, 2000-2002 рр.); «Розробка наукових основ створення адгезійно-активних припоїв, реактивних флюсів і технології паяння різнорідних з'єднань, що працюють під дією високих і низьких температур, жорстких циклічних теплових навантажень, радіаційного опромінення та ін.»; (номер державної реєстрації №0102U003961, 2002-2006 рр.); «Розробка присадних матеріалів для капілярного і некапілярного паяння і створення технологічних процесів з використанням цих матеріалів»; (номер держреєстрації 0110U001996, 2010-2012 рр.); «Створення матеріалів (флюсів) і технології пічного паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій в контрольованому газовому середовищі». (номер держреєстрації № 0118U002320, 2018-2019 рр.) Автор є співвиконавцем по всім вказаним темам.

### **Мета дисертації і задачі досліджень**

Метою дисертаційної роботи є створення нових реактивних фторидних високотемпературних флюсів та розробка технології реактивно-флюсового пічного паяння тонкостінних конструкцій з алюмінієвих сплавів Al, Al-Mn.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Дослідити температури солідусу, ліквідусу і характер хімічної взаємодії в сольовій системі K, Al, Si /F, визначити перспективні композиції флюсів;
2. Дослідити вплив гексафторсилікату кремнію ( $K_2SiF_6$ ) і калій-цинк фториду ( $KZnF_3$ ) на площу розтікання припою системи (Al-Si) та визначити оптимальне об'ємне співвідношення кількості флюсу до припою;
3. Дослідити структурні особливості паяних швів алюмінієвих з'єднань при застосуванні реактивних флюсів без присаджування припою та з припоєм;
4. Дослідити корозійну стійкість експериментальних флюсів після розтікання по алюмінієвій підкладці без присаджування припою та з припоєм;
5. Розробити принципову технологію пічного реактивно-флюсового паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій в захисному середовищі аргону.

**Об'єкт досліджень** – процеси високотемпературного реактивно-флюсового паяння та формування нероз'ємних з'єднань алюмінієвих сплавів з низьким вмістом магнію.

**Предмет досліджень** – структура, механічні властивості паяних тонкостінних з'єднань та технологічні властивості реактивних флюсів.

**Методи досліджень.** Визначення температури плавлення сольових сумішей проводили диференційним термічним аналізом з застосуванням дериватографа Derivatograph-C та установки ВДТА-8М3. Мікроструктуру паяних з'єднань досліджували за допомогою оптичного (Neophot-32) і скануючих растрових електронних мікроскопів (CAMSCAN, TescanMira 3 LMU). Мікрорентгеноспектральний аналіз залишків флюсу після паяння, окремих ділянок (фаз) паяного з'єднання проводили за допомогою енергодисперсійного спектрометра Oxford Instruments X-max 80 mm<sup>2</sup> з програмним пакетом INCA.

Міцність паяних з'єднань визначали випробовуванням на розтяг насувних листових зразків типу IV товщиною 1,0 мм на розривній машині Р-5 з максимальним зусиллям 50 кН.

Пічне паяння алюмінієвих зразків проводили в контрольованому середовищі (гелій, аргон високої чистоти) на лабораторній установці.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше визначено області стабільних, метастабільних і нестабільних сумішей фторидів на діаграмі плавкості сольової системи К, Al, Si/F та встановлено склади евтектик, (мас.%): потрійної KF(28) – K<sub>3</sub>SiF<sub>7</sub>(10) – K<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>(62) з температурою плавлення 715 °С і подвійної K<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> (19) – K<sub>3</sub>SiF<sub>7</sub> (81) з температурою плавлення 817 °С.

2. Вперше експериментально встановлено, що площа розтікання алюмінієво-кремнієвого припою зростає в 1,6 – 1,8 разів при збільшенні вмісту гексафторсилікату калію до 20 мас. % і калій-цинк фториду до 15 мас. % в складі реактивного флюсу KF-AlF<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>-KZnF<sub>3</sub> за умови утворення легкоплавкого тонкого (2-4 мкм і більше) шару системи Al-Si на поверхні основного металу при нагріві до температури, що перевищує температуру евтектики Al-12,5Si.

3. Вперше визначено закономірності структуроутворення швів алюмінієвих з'єднань за умов реактивно-флюсового пічного паяння без присаджування припою. На міжфазній границі основний метал-флюс кристалізуються дисперсні евтектичні включення поміж зерен основного металу, що обумовлено відновленням кремнію з флюсу і його взаємодією з алюмінієм. При паянні з присаджуванням припою в шві формується структура, яка містить дендрити твердого розчину на основі алюмінію і евтектичну складову.

4. Вперше встановлено, що різниця потенціалів корозії між алюмінієвою підкладкою та флюсом KF-AlF<sub>3</sub>-(K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>+AlF<sub>3</sub>) в системах: флюс-припій-алюміній та флюс-алюміній характеризується найменшою електрохімічною гетерогенністю і не перевищує 0,05В.

5. Вперше встановлено, що умовою забезпечення повноти алюмотермічного відновлення кремнію з флюсу KF-AlF<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> є співвідношення K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>/AlF<sub>3</sub> в межах 17/1–1,5/1, що сприяє зростанню масової частки припою системи Al-Si в вузькому зазорі та формуванню щільних паяних швів при оптимальній температурі (600-610 °С) паяння алюмінію.

**Практичне значення отриманих результатів** Створено негігроскопічні фторидні флюси і розроблено технологічний процес паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій в контрольованому газовому середовищі, який забезпечує високі показники міцності швів в умовах статичних і динамічних навантажень. Технологія пічного реактивно-флюсового паяння успішно пройшла дослідно-промислову перевірку на ПАТ «Київський завод «РАДАР», стосовно алюмінієвого тонкостінного хвильоводу і показала відповідність експлуатаційних характеристик паяного виробу вимогам ТУ і має практичну цінність для вітчизняних виробників радарних антен, що входять до складу навігаційних приладів літальних апаратів, стаціонарної і пересувної техніки.

**Особистий внесок здобувача** Особистий внесок здобувача полягає постановці мети і задач роботи, програми досліджень. Дисертація є результатом експериментальних, теоретичних і розрахункових досліджень, які автор проводив особисто, виготовляв фторидні реактивні флюси, дослідні зразки, паяні з'єднання, проводив обробку експериментальних результатів досліджень [1-25]. Аналіз та узагальнення отриманих результатів досліджень проводили спільно з науковим керівником. Автор виготовляв паяні макетні зразки і тонкостінні алюмінієві багатоелементні конструкції для проведення дослідно-промислової перевірки і впровадження технології при виготовленні алюмінієвих виробів в умовах контрольованого газового середовища.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи і наукові положення дисертації доповідались і обговорювались на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях: «Пайка в создании изделий современной техники» (г. Москва, РФ 1997); «Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Welding» (Aachen, Germany 1998); «IBSC-2000. Advanced Brazing and Soldering Technologies» (Albuquerque, USA 2000); «Пайка, современные технологии, материалы, конструкции: (г. Москва, РФ 2001); «2001'IBSC» (Yangshong, China 2001); «Сварка и родственные технологии в современном мире» (г. Санкт-Петербург, РФ 2002); «Пайка в приборостроении и машиностроении. Технология материалы» (г. Санкт-Петербург, РФ 2003); «Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции, опыт эксплуатации паяных конструкций» (г. Москва, РФ 2003); «Сварка и контроль – 2004» (г. Пермь, РФ 2004); «Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной пайки» (г. Москва, РФ 2004); «Современные методы металлообработки» (г. Минск, Беларусь 2005); «Сварка и родственные процессы в промышленности» (г. Киев, Украина 2007); «Сварка и родственные процессы – в третье тысячелетие» (г. Киев, Украина 2008).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи загалом опубліковано 25 наукових праць, в тому числі 6 статей у фахових науково-технічних журналах України (у т. ч. одна стаття в іноземному виданні, одна стаття в журналі, який входить до науково метричної бази «Scopus»), 2 розділи в книгах (у т. ч. один в іноземному виданні), 14 у збірниках міжнародних науково-технічних конференцій. Отримано 3 патенти України на винахід.

**Структура та обсяг дисертації.** Загальний об'єм роботи – 181 сторінка машинописного тексту, містить 79 рисунків, 26 таблиць, список використаної літератури з 159 найменувань на 14 сторінках, 5 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, формулювання мети й задач досліджень, наукових результатів і їх практичного значення, дані про зв'язок роботи з науковими темами. Висвітлено особистий внесок здобувача і наведено відомості про апробацію результатів роботи та кількість публікацій.

У першому розділі проведено аналіз фізико-хімічних властивостей алюмінієвих сплавів, способів високотемпературного паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій, сольових систем хлоридних і фторидних флюсів.

Показано, що технологія пічного паяння в контрольованому середовищі (в вакуумі і в чистому азоті) з обов'язковим використанням паяльних листів не застосовується для паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій (антен, хвильоводів). Це обумовлено складною геометрією, наявністю прямолінійних і криволінійних деталей з закритими профілями, конструктивними глухими заглибленнями, нерівномірними зазорами та труднодоступними ділянками потенціальних паяних швів. Застосування екологічно небезпечної технології паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій шляхом занурення в сольовий розплав обумовлює необхідність створення екологічно безпечного методу отримання паяних з'єднань алюмінієвих тонкостінних (товщиною від 0,1 мм і більше) багатоелементних конструкцій з закритими профілями і застосування некорозійноактивних флюсів. Визначені характерні складові реактивного флюсу та обґрунтований вибір неактивної основи з негігроскопічного і термостійкого фторалюмінату калію  $\text{KAlF}_4$  з температурою плавлення  $575^\circ\text{C}$ , яка нижче за температуру евтектичного перетворення припоїв системи Al-Si.

У другому розділі наведені матеріали, обладнання та методи досліджень. Одним з найважливіших критеріїв вибору матеріалів алюмінію АД1 та сплаву АМц з малою щільністю є зменшення товщини листових або багатошарових конструкцій, що забезпечують корозійну стійкість, експлуатаційну стабільність і високий коефіцієнт використання матеріалу в тонкостінних багатоелементних профільних конструкціях (фазованих антенних решітках, слот антенах і т. ін.).

Розрахункові дослідження термодинамічних умов ( $\Delta G$ ) проходження хімічних реакцій в системах  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – фториди, Al – фториди виконували за допомогою програми HSC версія 6,0 (2006).

Термічний аналіз сумішей сольової системи K, Al, Si /F з обраних реактивів фториду алюмінію марки "ч." ( $\text{AlF}_3$ ), фториду калію "ч.д.а." ( $\text{KF}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), гексафторсилікату калію "ч.д.а."  $\text{K}_2\text{SiF}_6$ , а також сіль  $\text{K}_3\text{SiF}_7$ , отриману термічним розкладанням  $\text{K}_2\text{SiF}_6$ , проводили в платиновому тиглі за допомогою дериватографа Derivatograph-C. Температуру солідусу і ліквідусу флюсів визначали диференційно-термічним методом за допомогою установки ВДТА-8М.

Виплавку основи реактивного флюсу з сполук  $\text{AlF}_3$  і  $\text{KF}$  проводили в тиглі з графіту марки МПГ-7 на високочастотній установці ВЧ 65А потужністю 40 кВт, робочою частотою 15-50 кГц. Синтез сполук  $\text{KAlF}_4$  (основа > 50 мас. %),  $\text{K}_2\text{SiF}_6$  та  $\text{KZnF}_3$  реактивного флюсу проводили в розчинах обраних недефіцитних реактивів: фтористоводнева кислота "ч." (48% HF), луг "хч." KOH, основа "х.ч."  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , діоксид кремнію "ч.д.а."  $\text{SiO}_2$  та оксиду цинку "ч." (ZnO) в лабораторному реакторі, а також сполуку  $\text{KZnF}_3$  в стаканах Р-4 з політерафторетилену. Створені негігроскопічні хімічні сполуки механічно подрібнювали до розміру часток менше 50 мкм в дисковому розтирачі, блендері Waring 800S та планетарному млині PQ-N04 Planetary Ball Mill. Аналіз сольових сумішей проводили на віброаналізаторі ВСА-1. Композиції флюсів виготовляли механічним змішуванням до рівномірного розподілення складових в дисперсному середовищі. Рентгенофазовий аналіз сольових сумішей здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3М в  $\text{CuK}\alpha$  випромінюванні.

Для дослідження процесу реактивно-флюсового паяння алюмінію АД1 і сплаву АМц використовували композиції флюсів системи  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$  з добавками  $AlF_3$  та  $KZnF_3$ . Перед паянням алюмінієві зразки очищали в водних розчинах: 15%  $NaOH$  – знежирювали, 20 об. %  $HNO_3$ , 2 об. %  $HF$  – травили та промивали між операціями в дистильованій воді. Дослідне паяння алюмінієвих зразків проводили на лабораторній установці в середовищі  $Ar$  ( $He$ ), яка дозволяє реалізовувати температурні профілі нагріву, що відповідають технології пічного паяння в контрольованому газовому середовищі. Площу розтікання припою після сканування зразка обраховували з цифрової копії за допомогою програми «Компас». Величину пропаю алюмінієвого зразка визначали заміром довжини якісного паяного шву з точністю 0,1 мм. Знімки зразка отримували за допомогою цифрової камери Panasonic FZ-30.

Корозійну стійкість розроблених флюсів визначали крапельним експрес-методом шляхом вимірювання потенціалу корозії алюмінієвої підкладки, припою та флюсу в розчині 3 %  $NaCl$  відносно насиченого хлоридсрібного електроду упродовж 30 хвилин за допомогою потенціостату ПИ-50-1.1.

Мікроструктуру паяних з'єднань досліджували за допомогою оптичного (Neophot-32) і скануючих растрових електронних мікроскопів (CAMSCAN, TescanMira 3 LMU). Міцність паяних з'єднань визначали випробовуванням на розтяг насувних листових зразків типу IV товщиною 1,0 мм на розривній машині Р-5 з максимальним зусиллям 50 кН.

У третьому розділі проведені розрахункові дослідження термодинамічних умов ( $\Delta G$ , енергія Гіббса) проходження хімічних реакцій в системах  $Al_2O_3$  – фториди,  $Al$  – фториди в інтервалі температури 0-1000 °С. Встановлено, що при температурі паяння ( $T=600$  °С) перспективні та негігроскопічні хімічні сполуки  $K_2SiF_6$ ,  $KZnF_3$  сприяють руйнуванню оксиду  $Al_2O_3$  та при взаємодії з алюмінієм відновлюються кремній і цинк (рис. 1, 2).

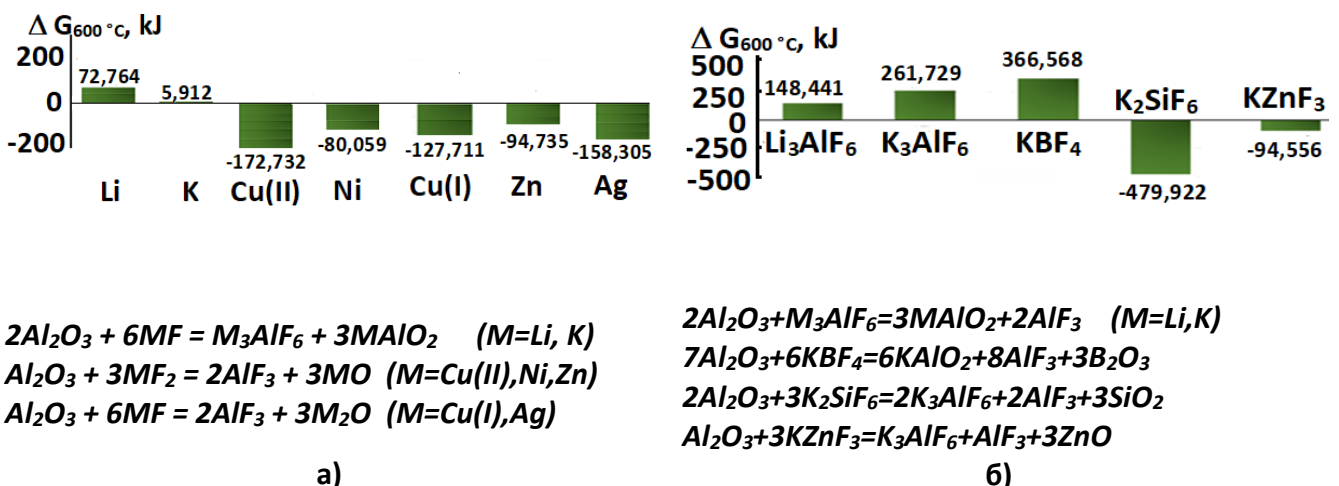


Рисунок 1 – Енергія Гіббса ( $\Delta G$ ) хімічних реакцій  $Al_2O_3$  –  $MF_n$  прості (а) та  $M_1M_2F_n$  комплексні (б) фториди при температурі  $T=600$  °С



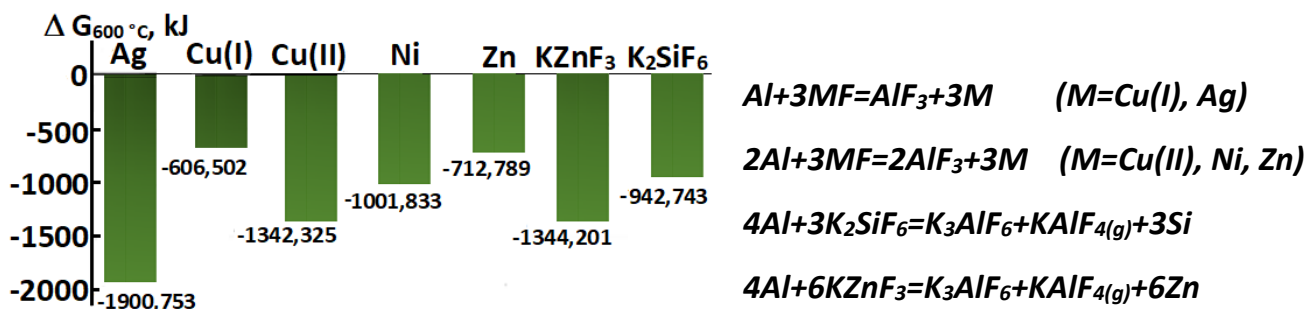


Рисунок 2 – Енергія Гіббса в ( $\Delta G$ ) хімічних реакцій Al-фториди при температурі  $T=600^\circ\text{C}$

Досліджено температуру солідусу та ліквідусу сольових розплавів, хімічну взаємодію в системі K, Al, Si/F. Встановлено межі стабільних (I) –  $KF-K_3SiF_7-K_3AlF_6$ , метастабільних (II) –  $K_3SiF_7-K_2SiF_6-AlF_3-K_3AlF_6$  та нестабільних (III) –  $K_2SiF_6-SiF_4-AlF_3$  складів фторидів даної сольової системи (рис. 3 а, б).

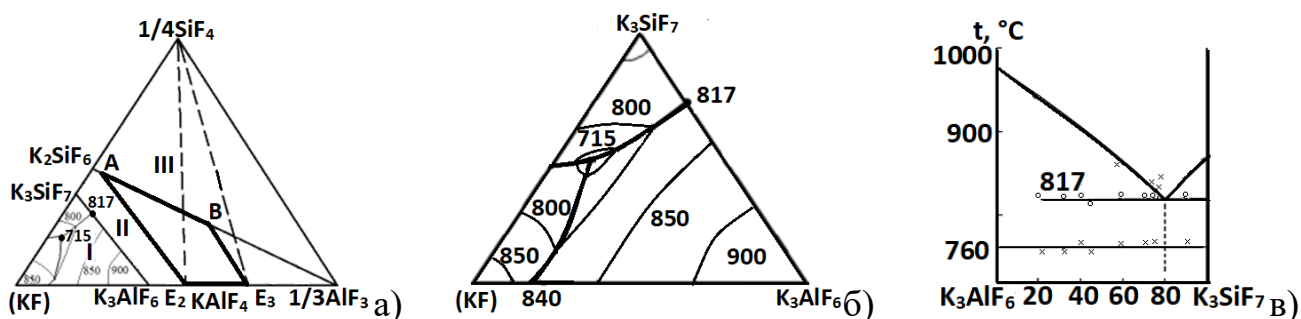


Рисунок 3 – Діаграма сольової системи K, Al, Si/F (а) та область I ( $KF-K_3SiF_7-K_3AlF_6$ ) в більшому масштабі (б), подвійна евтектика  $K_3AlF_6-K_3SiF_7$  (в)

Система  $KF-K_3AlF_6-K_3SiF_7$  є простою евтектичною (рис. 3 б). Потрійна евтектика (% мас.)  $KF(28)-K_3AlF_6(10)-K_3SiF_7(62)$  плавиться при  $715^\circ\text{C}$ . Подвійна евтектика  $K_3AlF_6-K_3SiF_7$  має температуру плавлення  $817^\circ\text{C}$  (рис. 3 в). В межах концентраційного трикутника  $K_3SiF_7-K_3AlF_6-AlF_3$  протікає хімічна взаємодія до повного вироблення надлишкового фториду алюмінію з утворенням кінцевих продуктів  $SiF_4$  і  $K_3AlF_6$  за реакцією (3.1):



Встановлено, що в потрійній системі  $KF-AlF_3-K_3SiF_7$  будь які суміші, що містять надлишковий  $AlF_3$  щодо стехіометрії  $K_3AlF_6$ , нестійкі і при розплавленні з часом перетворюються в двокомпонентні системи  $K_3AlF_6-AlF_3$  (рис. 4).

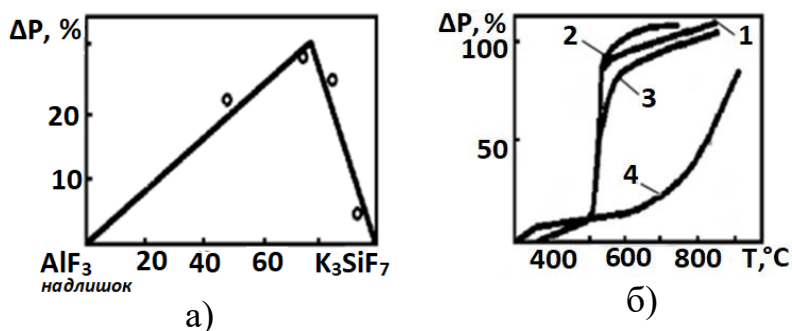


Рисунок 4 – Розрахункова (пряма) за реакцією (1) (а) та фактичні вірати маси ( $\Delta P, \%$ ) сумішей ( $0.44AlF_3+0.56K_3AlF_6$ ) –  $K_3SiF_7$  (б). Вміст  $K_3SiF_7$ , % (мас), точки: 1 – 3; 2 – 54.5; 3 – 73.1; 4 – 88. Нагрів  $V=12^\circ\text{C/хв}$ .

При утворенні рідкої фази (евтектика KF–AlF<sub>3</sub>) реакція розкладання K<sub>3</sub>SiF<sub>7</sub> з виділенням тетрафториду кремнію SiF<sub>4</sub> протікає більш повільно. За результатами досліджень на діаграмі сольової системи K, Al, Si / F (рис.3 а) визначена область E<sub>2</sub>–A–B–E<sub>3</sub>, що придатна для паяння алюмінію реактивним флюсом з температурою плавлення менше 580 °С.

Експериментально встановлено оптимальні умови плавки та синтезу, обрані найбільш відповідні реагенти, проведена оптимізація складу реактивних флюсів з суміші негігроскопічних сполук KAlF<sub>4</sub> і K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> та добавок AlF<sub>3</sub>, KZnF<sub>3</sub> рівномірно розподілених в дисперсному середовищі. Встановлено, що основа плавлених флюсів є суміш сполук KAlF<sub>4</sub> (більше 90 %), K<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> залишки та K<sub>2</sub>AlF<sub>5</sub> (сліди), а основа синтезованих флюсів це сполуки KAlF<sub>4</sub> та K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>.

У четвертому розділі встановлено особливості взаємодії реактивного флюсу сольової системи KF–AlF<sub>3</sub>–K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> (табл. 1) з графітовою (нейтральною) і алюмінієвою (реакційною) підкладками при температурі 605 ± 3° С (що вище температури 577 С утворення евтектики Al-12,5Si) в аргоні високої чистоти.

Таблиця 1 – Склад флюсу системи KF-AlF<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, мас. %

зразок	K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	(KAlF <sub>4</sub> , K <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> )
1	3	97
2	5	95
3	7	93
4	10	90

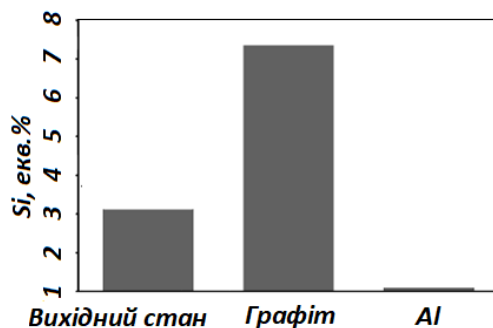
Визначено вміст елементів (середнє значення 9 ділянок зразка) в залишках флюсу після паяння. Розрахунок в еквівалентних процентах (екв. % (% E) за формулою (1) представлений на (рис. 5, 6):

$$\% E = \left( \frac{P_E \times Z_E / A_E}{3 \times P_{Al} / A_{Al} + 4 \times P_{Si} / A_{Si} + P_K / A_K} \right) * 100\%$$

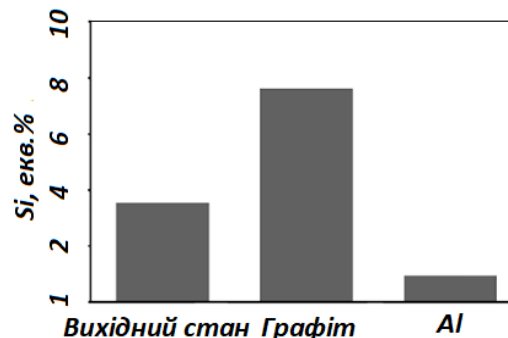
де P<sub>E</sub> (мас. %) згідно результатів мікрорентгеноспектрального аналізу,

A<sub>E</sub> – атомні маси елементів, Z<sub>e</sub> числа еквівалентності, які дорівнюють 1 для калію (K) і фтору (F), 2 для кисню (O), 3 для (Al) і 4 для (Si). Вуглець в розрахунках не враховувався, оскільки передбачалося, що він знаходиться у вільному стані.

За результатами досліджень визначено нульовий вміст кремнію в залишках флюсу на Al підкладці, що вказує на його участь в утворенні легкоплавкого сплаву системи Al-Si сплаву при контактному евтектичному плавленні (рис. 5)

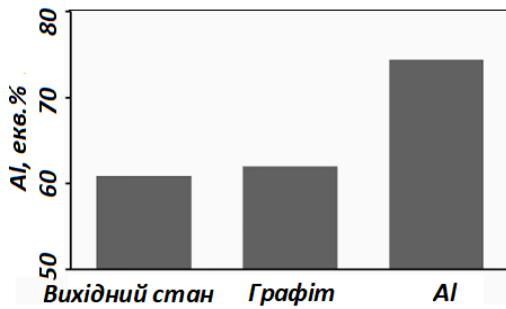


а)

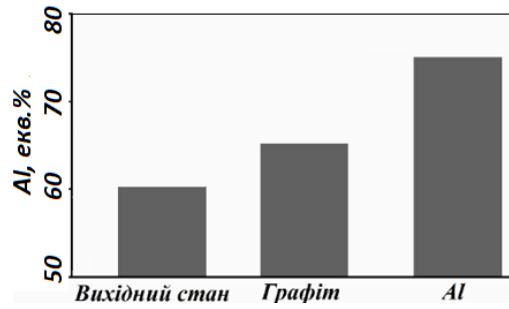


б)

Рисунок 5 – Вміст Si в залишках флюсів №1 (а) і № 2 (б) на Al та графітовій підкладках



а)



б)

Рисунок 6 – Вміст Al в залишках флюсів №1(а) і №2 (б) на Al та графітовій підкладках

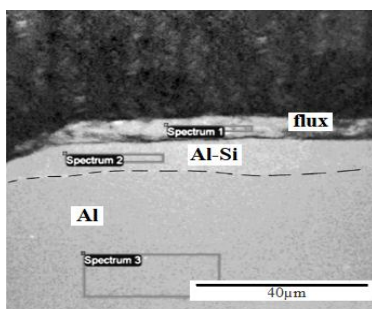
Встановлено, що в залишках флюсу на графітовій підкладці вміст кремнію відповідає його вмісту в вихідному складі флюсу. Також можна стверджувати, що реакція розкладання  $K_2SiF_6$  з виділенням тетрафториду кремнію  $SiF_4$  не встигає відбутися при даних температурно-часових режимах нагрівання. Вміст алюмінію в залишках флюсу, що отримані на Al підкладці, завжди вищий ніж у вихідному стані (рис. 6). У всіх зразках на графітових підкладках співвідношення фтор/катиони істотно більше за 1 і присутній вуглець.

Визначено, що при нагріванні на поверхні Al підкладки відбуваються два процеси: відновлення кремнію з флюсу (реакція 4.1) і подальше формування рідкого сплаву (рис. 7, а) при контактному-реактивному плавленні компонентів з обмеженою розчинністю у твердому стані, що утворюють евтектичну систему Al-Si (реакція 4.2):

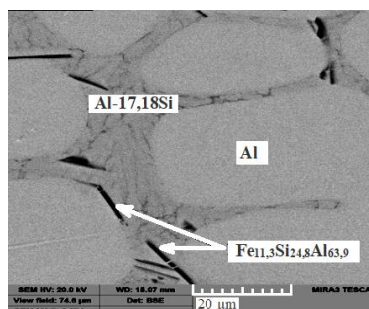


де  $(SiF)_{\text{зв'язаний}}$  – вказує на стан, в якому перебуває кремній до його відновлення.

Мікроструктура закристалізованого металічного шару Al-Si містить зерна  $\alpha$ -твердого розчину на основі алюмінію, заевтектичну складову з концентрацією кремнію (мас. %): 17.18, а також окремі дисперсні включення пластинчастої фази  $Fe_{11,3}Si_{24,8}Al_{63,9}$ , яка за стехіометричним складом близька до сполуки  $FeSiAl_5$  (рис. 7,б).



а)



б)

Рисунок 7 – Поперечний переріз Al підкладки (а) та мікроструктура сформованого металевого шару Al-Si (б) після хімічної взаємодії з флюсом  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$

Розтікання припою системи Al-Si по алюмінію АД1 і сплаву АМц при нагріві вище температури  $577^\circ C$  евтектики Al-12,5Si з застосуванням реактивного флюсу  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$  можна розділити на окремі стадії (рис. 8):

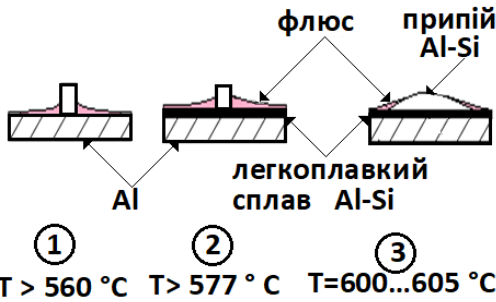
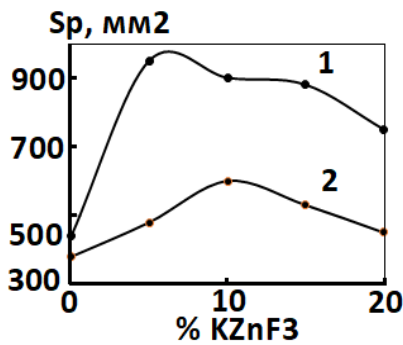


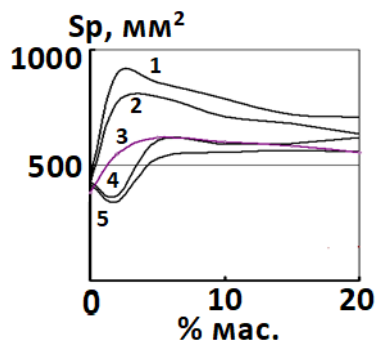
Рисунок 8 – Схема (стадії: 1, 2, 3) розтікання припою на поверхні алюмінію з застосуванням реактивного флюсу:

(1) – розплав флюсу за секунди руйнує шар оксиду ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) та очищує поверхню Al;  
 (2) – відновлений з флюсу кремній при подальшому контактному плавленні утворює суцільний шар легкоплавкого сплаву системи Al-Si;  
 (3) – умови змочування і розтікання припою Al-Si покращуються при взаємодії з легкоплавким сплавом тієї ж системи до моменту набуття рівноважної форми каплі на поверхні Al

Встановлено, що застосування реактивного флюсу  $\text{KF-AlF}_3\text{-K}_2\text{SiF}_6$  при нагріві сприяє збільшенню площі розтікання припою Al-Si середовищі газу (He та Ar високої чистоти) в порівнянні з повітряним середовищем (рис. 9, а). Підвищення вмісту до 20 мас. %  $\text{K}_2\text{SiF}_6$  і до 15 мас.%  $\text{KZnF}_3$  в складі флюсу збільшує площу розтікання припою в 1,6...1,8 разів (АД1) і в 1,2...1,4 разів (АМЦ) (рис. 9, б).



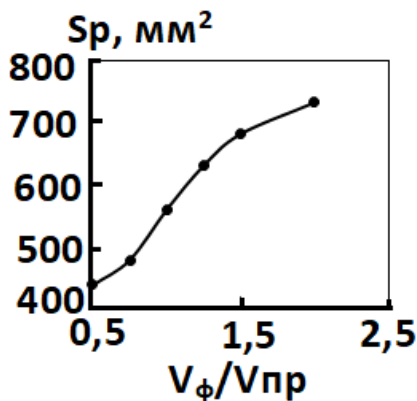
а)



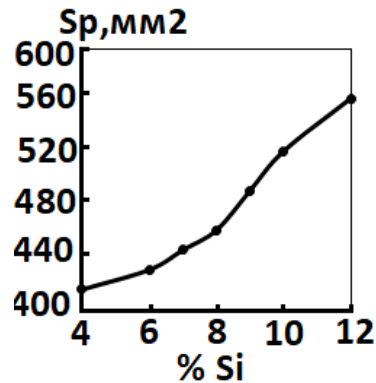
б)

Рисунок 9 – Площа розтікання ( $S_p$ ) припою Al-12Si (0,17 г) на поверхні зразка. Флюс  $\text{KF-AlF}_3\text{-K}_2\text{SiF}_6\text{-KZnF}_3$ : 1 – He, 2 – повітря, АД1 (а); Ar, АД1: 1 – ( $\text{K}_2\text{SiF}_6 + \text{KZnF}_3$ ), 2 –  $\text{K}_2\text{SiF}_6$ , повітря 3 – ( $\text{K}_2\text{SiF}_6 + \text{KZnF}_3$ ), Ar, АМЦ: 4 – ( $\text{K}_2\text{SiF}_6 + \text{KZnF}_3$ ); повітря 5 –  $\text{K}_2\text{SiF}_6$  (б).  $T_{\text{п}} = 600 \dots 605\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $V_{\text{ф}}/V_{\text{пр}}=1:1$

За результатами досліджень встановлено, що зі збільшенням об'ємного співвідношення флюс/припій більшає площа розтікання евтектичного (рис. 10, а) і доевтектичного припоїв (рис. 10, б).



а)



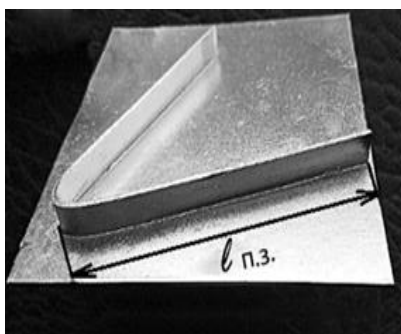
б)

Рисунок 10 – Площа розтікання ( $S_p$ ) припою Al-12Si (0,17 г;  $V=64\text{ мм}^3$ ) на поверхні алюмінію АД1. Флюс  $\text{KF-AlF}_3\text{-10K}_2\text{SiF}_6$ ; флюс/припій –  $V_{\text{ф}}/V_{\text{пр}}$  (а); доевтектичного припою Al – (4...10Si),  $V_{\text{ф}}/V_{\text{пр}}=1:1$  (б). ( $T_{\text{п}} = 600 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; аргон)

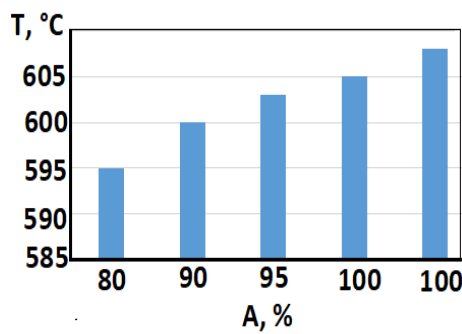
При проходженні алюмотермічного відновлення з флюсу кремній осаджується на поверхні алюмінію, а також частково переходить в припій, що, збільшує об'єм утвореної рідкої фази сплаву Al-Si.

Досліджено формування єднань алюмінію і сплаву АМц при пічному паянні в аргоні високої чистоти з припоєм і без присаджування припою.

Встановлені оптимальні температурно-часові режими пічного реактивно-флюсового паяння зразків (оптимальна швидкість нагріву  $V = 35-46 \text{ }^\circ\text{C/хв.}$  з моменту розплавлення флюсу до температури паяння  $T_p = 605 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , час витримки  $\tau = 2 \text{ хв.}$ ), при яких забезпечується величина пропаю 95-100 % нерівномірного зазору 0,05...0,1 мм (рис. 11). За результатами досліджень розроблено порошковий дріт з оболонки зі сплаву Al-Si і флюсу-наповнювача KF-AlF<sub>3</sub>-(K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>+AlF<sub>3</sub>). Встановлено, що при співвідношенні флюс/метал оболонки = 1/1,17-1/10 підвищується (на 30%) довжина паяного шву, і відповідно, масова частка припою системи Al-Si в нерівномірному зазорі порівняно з флюсом NOCOLOK (рис. 11, а)



а)



б)

Рисунок 11 – Зовнішній вигляд паяного зразка сплаву АМц з зазором 0,05...0,1 мм (а). Порошковий дріт Al-12Si (ПД), (Лпз) – довжина паяного з'єднання. Вплив температури на величину пропаю А (%) (б)

Дослідженнями фізико-хімічних процесів в гетерогенній системі «реактивний флюс-припій-алюміній» в умовах високотемпературного паяння встановлено, що при взаємодії флюсу KF-AlF<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> утворений при контактному-реактивному плавленні легкоплавкий сплав Al-Si може самостійно виконувати функцію припою та покращує формування нероз'ємних з'єднань з вузьким (капілярним) зазором (рис.12).

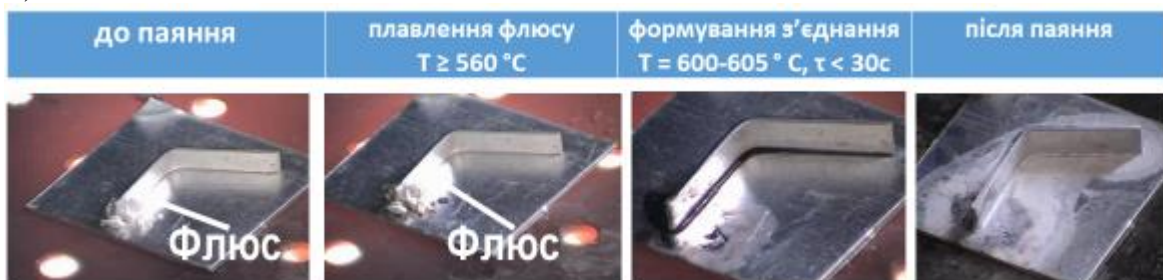


Рисунок 12 – Стадії формування паяного з'єднання алюмінію АД1 без присаджування припою. Флюс KF-AlF<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>.  $T = 600...605 \text{ }^\circ\text{C}$ , капілярний зазор, аргон

Визначено, що найбільш придатною є область E<sub>2</sub>-A-B-E<sub>3</sub> на діаграмі сольової системи K, Al, Si /F (рис. 3 а) для паяння алюмінію без додавання припою, в якій проходженню процесу відновлення кремнію з флюсу не викликає значного підвищення температури ліквідусу сольового розплаву. Показано, що сполука AlF<sub>3</sub> в

межах співвідношення  $K_2SiF_6/AlF_3=17/1-1/1$  сприяє повному проходженню алюмотермічного відновлення кремнію і відповідно підвищує масову частку припою в обмеженому просторі паяльного зазору (рис. 13, е).

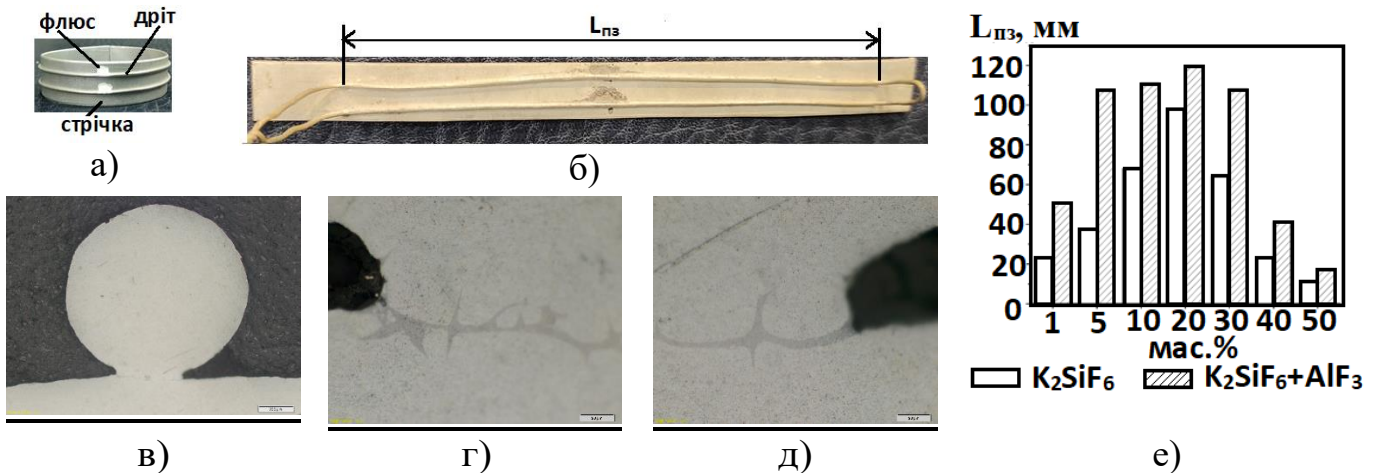


Рисунок 13 – З'єднання алюмінію АД1 паяне без присаджування припою. Флюс  $KF-AlF_3-(K_2SiF_6 + AlF_3)$  (0,01 г). Зразок стрічка-дріт з практично «нульовий» зазором до (а) і після паяння (б), мікроструктура (г, ділянки д, е) та  $L_{пз}$  – довжина з'єднання (е)

За результатами металографічних досліджень встановлено, що при застосуванні припою і флюсу структура паяного шва складається з дендритів твердого розчину на основі алюмінію та евтектики, яка виділяється в міждендритних проміжках (рис. 14, а; 15, а). Вміст кремнію в  $\alpha$ -твердому розчині на основі алюмінію значно менший (0,4 %) ніж в евтектичній складовій (біля 12,5 %).

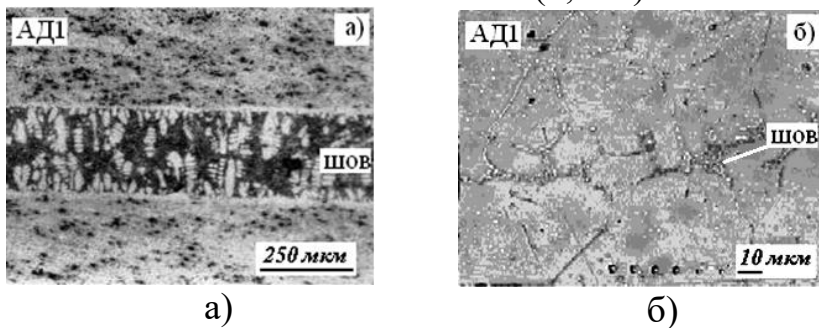


Рисунок 14 – Мікроструктура паяного з'єднання сплаву АД1. Флюс  $KF-AlF_3-10K_2SiF_6$ ; припій Al-12Si (а), без присаджування припою (б); ( $T_{п} = 600 \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ , час витримки  $\tau = 90 \text{ с}$ , Ar)

В паяних швах при застосуванні реактивного флюсу без присаджування припою формується, відповідно малий об'єм евтектичної фази пластинчастого типу (рис. 14,б ) При паянні без присаджування припою (тільки з флюсом) формується структура, яка характерна при проникненні рідкої фази легкоплавкого сплаву Al-Si по границям зерен основного металу (рис. 15, б).

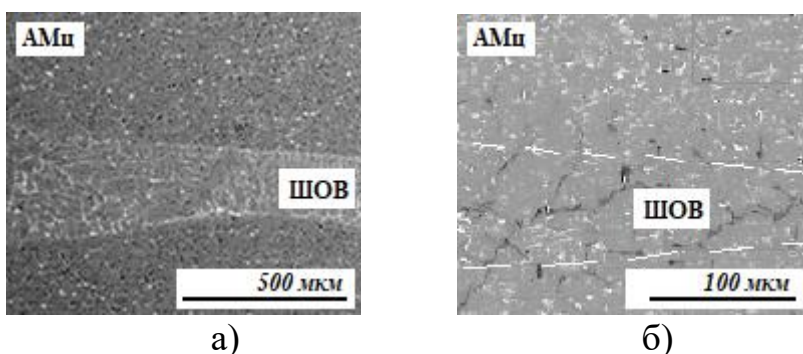


Рисунок 15 – Мікроструктура з'єднання АД1 (а) та ділянка паяного шва (б): припій Al-12Si, флюс  $KF-AlF_3-10K_2SiF_6$  ( $T_{п} = 600 \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 90 \text{ с}$ )

Вміст Si в зернах первинного  $\alpha_{Al}$  твердого розчину змінюється від 0,96 до 1,98 (мас. %), що можна пояснити нерівноважними умовами кристалізації. В міжзеренних прошарках  $\alpha_{Al}$  – твердого розчину на основі алюмінію виявлено незначну кількість інтерметалідних фаз  $Al_xSi_yFe_z$  (вкраплення світлого тону) змінного складу. Це вказує на те, що при кристалізації металу паяного шва в нерівноважних умовах та наявності градієнту концентрацій складових елементів основного металу і легкоплавкого сплаву, інтерметалідні фази Al-Si-Fe кристалізуються в міжзеренних прошарках (рис.15, б).

За результатами випробувань при кімнатній температурі на розтяг паяних реактивним флюсом без присаджування припою насувних зразків (рис. 16) визначено, що міцність паяного шву вища ніж міцність алюмінію АД1. Встановлено, що сполука  $KZnF_3$  в межах 2...20 мас.% в складі флюсу  $KF-AlF_3-(K_2SiF_6+AlF_3)$  сприяє підвищенню на 40 % міцності на зріз паяних з'єднань сплаву АМц.



Рисунок 16 – Зовнішній вигляд зразків паяних реактивним флюсом  $KF-AlF_3-(K_2SiF_6 + AlF_3 + KZnF_3)$  без присаджування припою після випробувань: алюміній АД1+АД1 (а), сплав АМц+АМц (б)

Визначено, що різниця потенціалів між алюмінієвою підкладкою та флюсом  $KF-AlF_3-(K_2SiF_6+AlF_3)$  в гетерогенній системі Al–припій (Al-12Si)–флюс, яка не перевищує 0,05В, що відповідає вимогам стандарту і характеризується найменшою електрохімічною гетерогенністю (рис.17).

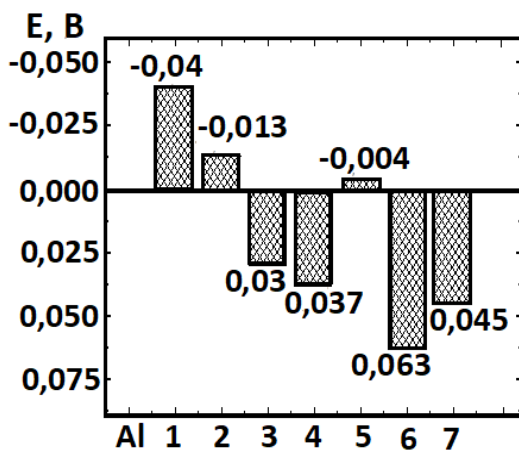


Рисунок. 17 - Різниця потенціалів корозії між Al, припоєм Al-12Si (ПП) та флюсом (Ф):

0–Al (АД1 потенціал корозії  $E = -0,961V$ );

1–Al-(Ф  $KF-AlF_3$ , NOCOLOK);

2–Al-(ПП+Ф  $10K_2SiF_6+2AlF_3$ +основа);

3–Al-(ПП+Ф  $10K_2SiF_6+2AlF_3+10KZnF_3$ +основа);

4–Al-(ПП+Ф  $15K_2SiF_6+3AlF_3+5KZnF_3$ +основа);

5–Al-(Ф  $10K_2SiF_6+2AlF_3$ +основа);

6–Al-(Ф  $15K_2SiF_6+3AlF_3+10KZnF_3$ +основа);

7–Al-(Ф  $15K_2SiF_6+3AlF_3+5KZnF_3$ +основа)

**П'ятий розділ** присвячений дослідно-промислового впровадженню розробленої технології реактивно-флюсового паяння тонкостінних алюмінієвих конструкцій (хвильоводу, фазованої антенної решітки, слот антени пластинчатих алюмінієвих радіаторів термоелектричних модулів для систем підігрівання і охолодження води) в середовищі захисного газу аргону.

На базі результатів досліджень розроблено технологію пічного реактивно-флюсового паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій в аргоні реактивним флюсом з припоєм та без присаджування припою, яка забезпечує пропай 95-100 % від сумарної довжини швів. Результати комплексних механічних випробувань в

умовах значних навантажень (зокрема, вібрація в діапазоні частот від 20 до 2000 Гц, удари з прискоренням до 35 g) показали високу міцність і цілісність паяної тонкостінної конструкції. Розроблено технологічну інструкцію стосовно процесу реактивно-флюсового паяння в умовах контрольованого газового середовища,

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Визначено характерні складові та обґрунтовано вибір неактивної основи флюсів з негігроскопічного і термостійкого тетрафторалюмінату калію  $KAlF_4$  з температурою плавлення  $575\text{ }^\circ\text{C}$ , що нижча за температуру евтектичного перетворення припоїв системи Al-Si.

2. За розрахунками енергії Гіббса в системах оксид ( $Al_2O_3$ )-фторид, алюміній (Al) - фторид визначені перспективні добавки – кремнефторид калію ( $K_2SiF_6$ ) і калій-цинк фторид ( $KZnF_3$ ), які виконують дві функції: (1) – сприяють руйнуванню оксиду ( $Al_2O_3$ ) алюмінію; (2) – при взаємодії з алюмінієм відновлюються кремній і цинк.

3. Вперше досліджено плавкість і хімічну взаємодію в сольовій системі K, Al, Si/F, визначено області стабільного, метастабільного і нестабільного станів. Встановлено, що стабільні склади досліджуваної системи знаходяться в межах трикутника  $KF-K_3AlF_6-K_3SiF_7$ . Потрійна евтектика (% мас.)  $KF(28)-K_3AlF_6(10)K_3SiF_7(62)$  плавиться при  $715\text{ }^\circ\text{C}$ . Подвійна евтектика  $K_3AlF_6(18)-K_3SiF_7(82)$  - при  $817\text{ }^\circ\text{C}$ . В розплавах, що не відносяться до вказанного трикутника, можлива хімічна взаємодія з виділенням кремнію в газову фазу  $SiF_4$ .

4. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу залишків реактивних флюсів після їх розплавлення при температурі  $600 \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$  в атмосфері аргону високої чистоти на хімічно активній (алюміній) та умовно нейтральній (графіт) підкладках показали, що реакція розкладання  $K_2SiF_6$  з виділенням кремнію у вигляді летючого  $SiF_4$  не встигає відбутися в умовах паяння. Встановлено практично нульовий вміст кремнію в залишках флюсу на алюмінієвій підкладці.

6. Встановлено, що при взаємодії реактивного флюсу сольової системи  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$  в атмосфері аргону високої чистоти на контактній поверхні алюмінію при температурі, що вища утворення подвійної евтектики Al-Si відбуваються два процеси: відновлення кремнію зі складу кремнефториду калію і контактно-реактивне плавлення кремнію з алюмінієм. В результаті такої взаємодії формується металічний шар системи Al-Si, склад якого близький до заевтектичного, що підтверджено результатами мікрорентгеноспектрального аналізу. Мікроструктура закристилізованого металічного шару Al-Si містить зерна твердого розчину на основі алюмінію, заевтектичну складову з концентрацією кремнію (мас. %): 15,48–17,18, а також окремі дискретні включення пластинчастої фази  $Fe_{11}Si_{25}Al_{64}$ .

7. За результатами досліджень кінетики розтікання припоїв з застосуванням реактивних флюсів встановлено, що добавки  $K_2SiF_6$ ,  $AlF_3$ ,  $KZnF_3$  підвищують площу розтікання в 1,6...1,8 разів, порівняно з неактивним флюсом NOCOLOK. Визначено оптимальні співвідношення припій/флюс = 1/1,0...1,5.

8. Визначено, що різниця потенціалів між алюмінієвою підкладкою та флюсом  $KF-AlF_3-(K_2SiF_6+AlF_3)$  в гетерогенній системі Al-припій (Al-12Si)-флюс ( $KF-AlF_3$ ,



$KF-AlF_3-(K_2SiF_6+AlF_3)$  не перевищує 0,05В, що відповідає вимогам стандарту і характеризується найменшою електрохімічною гетерогенністю

9. Визначено, що найбільш придатною для перспективних складів реактивного флюсу для паяння алюмінію є область обмежена чотирикутником  $E_2-A-B-E_3$ . Встановлено, що в результаті проходження алюмотермічного відновлення кремнію і його взаємодією з алюмінієм є утворення легкоплавкого сплаву системи Al-Si, який виконує функцію припою. Показано, що фторид алюмінію в межах співвідношення  $K_2SiF_6/AlF_3 = 17/1 - 1,5/1$  сприяє повному проходженню алюмотермічного відновлення кремнію і відповідно підвищує масову частку припою в паяльному зазорі. За результатами випробувань на розтяг паяних насувних зразків сплаву АМц визначено, що добавка 10-20 мас. % калій-цинк фториду ( $KZnF_3$ ) до реактивного флюсу сприяє підвищенню міцності на зріз на 20 %.

10. На основі проведених досліджень створено негігроскопічні фторидні флюси, отримано 3 патенти України на винахід і розроблено технологічний процес паяння алюмінієвих конструкцій хвильоводу в контрольованому газовому середовищі (стосовно радарних антен, які входять до складу навігаційних приладів літальних апаратів, стаціонарної і пересувної техніки), які апробовано на ПАТ «Київський завод «РАДАР», підготовлено технологічну інструкцію. Дослідно-промислові випробування експлуатаційних характеристик паяного виробу в умовах Замовника показали їх відповідність вимогам ТУ.

### СПИСОК ОПУБЛЮКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Андрийко А.А., Панов Э.В., Яковлев В.В., Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Плавкость и химическое взаимодействие в солевой системе K, Al, Si/F. *Украинский химический журнал*. 1997. т. 63. № 10. С. 121–124.

2. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Материалы и технология флюсовой пайки алюминия и алюминия с нержавеющей сталью. *Автоматическая сварка*. 2005. № 8. С. 69–75.

3. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Реактивный фторидный флюс для пайки алюминия и разнородных соединений. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2006, вып. 39. С. 68–76.

4. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М., Кучук-Яценко В.С. Пайка алюминия и композиционных материалов на его основе. *Энциклопедия*. В 40 т. Т. 3-4 Технология сварки, пайки и резки. Москва. РФ. 2006. С. 648-651

5. Khorunov V.F., Sabadash O.M. Reactive-Flux Brazing of Aluminium to Steel. *Welding & Material Testing*. 2009. no. 4. P.46–50.

6. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Флюсовая дуговая пайка алюминия с оцинкованной сталью. *Автоматическая сварка*. 2013. № 2. С. 32–37.

7. Khorunov V.F., Sabadash O.M. Brazing of Aluminium and Aluminium to Steel. *Advances in Brazing. Science Technology and Applications* /ed. By Dušan P. Seculić. Oxford-Cambridge Woodhead Publishing, England. 2013. Ch. 9. P. 249–279.

8. Патент України (UA) на винахід №103963. В23К 35/363 (2006.1). Реактивный флюс для паяния алюминию та його сплавів/ Сабадаш О.М., Хорунов

В.Ф., Андрійко О.О. № а 2012 09025; заяв. 23.07. 2012; опубл. 10.12.2013. Бюл. № 23.

9. Патент України (UA) на винахід № 106923. В22F 7/04, В23К 35/363, В23К 35/14 (2006.1). Порошковий дріт для паяння алюмінію та його сплавів./Сабадаш О.М., Хорунов В.Ф. № а 2013 01261; заяв. 04.02.2013; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 20.

10. Сабадаш О.М., Максимова С. В. Формування та структура шару Al–Si на контактній поверхні алюміній–реактивний флюс системи KF–AlF<sub>3</sub>–K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. *Металофізика і новітні технології*. 2020, т. 42, № 8, С. 1079–1092.

11. Патент України (UA) на винахід № 122452. В23К 35/14, В23К 35/363, В23К 103/10 (2006.01). Реактивний флюс для паяння алюмінієвих сплавів. Сабадаш О.М., Максимова С. В., Ковальчук П. В., Богатирьов М. М. № а 2019 01205; заяв. 06.02.2019; опубл.10.11.2020. Бюл. № 21.

12. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М., Андрейко О.О. Перспективы использования некоррозионноактивных флюсов системы KF-AlF<sub>3</sub> для пайки алюминия. *Пайка в создании изделий современной техники: Материалы Междунар. конф.* 6-9 сентября 1997. Москва. РФ. С. 74-76.

13. Khorunov V.F., Sabadash O.M., Andreiko A.A. Investigation of Fusibility and Chemical Interaction in the K,Al,Si/F Salt System Fluxes for High-Temperature Brazing of Aluminium. *Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Welding. Proc. Intern. Conf.* July 16-18.1998. Aachen. Germany. P. 192–201.

14. Khorunov V.F., Sabadash O.M., Kuchuk-Jatsenko V.S. Technology for Brazing Aluminium to Steel. *IBSC-2000. Advanced Brazing and Soldering Technologies: Proc. Intern. Brazing and Soldering Conf.* April 2–5. 2000. Albuquerque. USA. P. 228–331.

15. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М., Андрейко О.О. Высокотемпературная пайка алюминия с использованием флюса системы K, Al, Si/F. *Пайка, современные технологии, материалы, конструкции: Материалы междунар. конф.* 22-26 янв. 2001. Москва. РФ.С. 37–40.

16. Khorunov V.F., Sabadash O.M. Technology and Equipment for Brazing Aluminum. “2001’IBSC”:*Proc. of 2001 Intern. Brazing and Soldering Conf.* October 29–31. 2001. Yangshong. China. P. 140–144.

17. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М., Андрійко О.О. Опыт применения некоррозионноактивных флюсов при высокотемпературной пайке алюминия. *Сварка и родственные технологии в современном мире: Материалы междунар. науч.-практич. конф.* Т. 2. 28-31 мая 2002. Санкт-Петербург. РФ.С. 26–29.

18. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Реактивные флюсы для высокотемпературной и низкотемпературной пайки алюминия. Опыт применения некоррозионноактивных флюсов при высокотемпературной пайке алюминия. *Пайка в приборостроении и машиностроении. Технология материалы. Труды Междунар. научно-практич. семин.* Т. 2. 9–10 декабря 2003. Санкт-Петербург. РФ. С. 32–36.

19. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Высокотемпературная флюсовая пайка алюминия со сталью 12X18H10T. *Пайка в приборостроении и машиностроении. Технология материалы: Труды Междунар. научно-практич. семин.* Т.2. 9–10 декабря 2003. Санкт-Петербург. РФ.С. 13–17.

20. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Особенности взаимодействия флюсов системы KF–AlF<sub>3</sub>–K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. *Пайка. Современные технологии, материалы,*

конструкції, опыт эксплуатации паяных конструкций: *Материалы конф.* 23–24 апреля 2003. Москва. РФ. С. 126–129.

21. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Флюсы для высоко- и низкотемпературной пайки алюминия *Сварка и контроль – 2004. Сборник докладов Межд. конф. т. 2.* 17–20 мая 2004. Пермь. РФ. С. 295–300.

22. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Технология флюсовой пайки алюминия с коррозионностойкой сталью. *Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной пайки: Материалы семинара Пайка-2004.* 24 – 25 ноября 2004. Москва. РФ С. 53–56.

23. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Пайка алюминия. *Современные методы металлообработки: Материалы междунар. науч.-техн. конф.* 14 – 17 июня 2005. Минск. Беларусь. С. 450–453.

24. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Реактивный флюс для пайки алюминия. *Сварка и родственные процессы в промышленности: Доклады 2-го науч.-технич. семинара.* 17 апреля. 2007. Киев. С. 48–49.

25. Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. Реактивно-флюсовая пайка алюминия и алюминия с нержавеющей сталью. *Сварка и родственные процессы – в третье тысячелетие. Тезисы докладов Междунар. конф.* 24-26 ноября 2008. Киев. С. 114.

## АННОТАЦІЯ

Сабадаш О.М. Технологія реактивно-флюсового паяння тонкостінних конструкцій з алюмінієвих сплавів Al, Al-Mn – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - «Зварювання та споріднені процеси і технології» – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена створенню фторидних реактивних флюсів, розробці технології пічного паяння алюмінієвих тонкостінних (від 0,1 мм і більше) багатоелементних конструкцій зі складними замкнутими профілями в атмосфері аргону високої чистоти.

В роботі досліджено процеси високотемпературного реактивно-флюсового паяння тонкостінних алюмінієвих конструкцій з використанням реактивних флюсів сольової системи K, Al, Si/F, які сприяють повному проходженню алюмотермічного відновлення кремнію з флюсу  $KF-AlF_3-(K_2SiF_6+AlF_3)$  і, відповідно, підвищують масову долю новоутвореного алюмінієво-кремнієвого припою в вузькому зазорі, що забезпечує формування нероз'ємних з'єднань з високою міцністю та значною величиною пропаю.

Визначено структурні особливості формування паяних з'єднань з припоєм та без присаджування припою. При паянні без присаджування припою (тільки з флюсом) формується структура, яка характерна при проникненні рідкої фази легкоплавкого сплаву Al-Si по границям зерен основного металу.

Визначено, що різниця потенціалів між алюмінієвою підкладкою та флюсом  $KF-AlF_3-(K_2SiF_6+AlF_3)$  в системі Al–припій (Al-12Si)–флюс не перевищує 0,05В, що характеризується найменшою електрохімічною гетерогенністю.

Результати комплексних механічних випробувань в умовах значних навантажень (зокрема, вібрація в діапазоні частот від 20 до 2000 Гц, удари з прискоренням до 35 g) показали високу міцність і цілісність паяної тонкостінної конструкції.

На базі результатів досліджень створено негіроскопічні фторидні флюси, розроблено технологічний процес пічного паяння тонкостінних алюмінієвих конструкцій хвильоводу в контрольованому газовому середовищі.

**Ключові слова:** алюміній, реактивно-флюсове паяння, флюс, припій, мікроструктура, паяне з'єднання, корозія.

## ABSTRACT

Sabadash O.M. Technology of reactive-flux brazing of thin-walled structures of aluminum alloys Al, Al-Mn – Manuscript.

Thesis for scientific degree of the Candidate of Technical Sciences (Ph. D) on, specialty 05.03.06 "Welding and related processes and technologies". E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to creation of fluoride reactive fluxes, development of technology of brazing of aluminum thin - walled (from 0,1 mm and more) multielement designs with difficult closed profiles in the high purity argon atmosphere.

The processes of high-temperature reactive-flux brazing of aluminum alloys with low magnesium content using reactive fluxes of the salt system K, Al, Si/F, which contribute to the full passage of aluminothermic reduction of silicon from the flux  $KF-AlF_3-(K_2SiF_6+AlF_3)$  and, accordingly, increases the mass fraction of newly formed aluminum-silicon alloy in the narrow gap, which provides the formation of of integral joints with high strength at the level of the base material and a significant filling of brazing seam.

On the contact surface of aluminum at a temperature above the formation of a double eutectic Al-Si, two processes occur: the reduction of silicon from the composition of potassium silicon fluoride and contact-reactive melting of silicon with aluminum. As a result of this interaction, a metal layer of the Al-Si system is formed, the composition of which is close to the eutectic, which is confirmed by the results of micro-X-ray spectral analysis.

The microstructure of the crystallized metal layer Al-Si contains grains of solid solution based on aluminum, supereutectic component with a concentration of silicon (wt.%): 15,48–17.18, as well as separate discrete inclusions of the plate phase  $Fe_{11}Si_{25}Al_{64}$ .

The structural features of the formation of brazing joints with filler metal and without the addition of filler metal are determined. When brazing without the addition of filler metal (only with flux), a structure is formed, which is characteristic of the penetration of

the liquid phase of the low-melting alloy Al-Si along the grain boundaries of the parent metal.

It is determined that the potential difference between the aluminum substrate and the  $\text{KF-AlF}_3\text{-(K}_2\text{SiF}_6\text{+AlF}_3)$  flux in the Al–filler metal(Al-12Si)–flux system does not exceed 0.05 V, which is characterized by the lowest electrochemical heterogeneity.

The results of complex mechanical tests under heavy loads (in particular, vibration in the frequency range from 20 to 2000 Hz, shocks with acceleration up to 35 g) showed high strength and integrity of the brazed thin-walled structure.

Based on the research results, non-hygroscopic fluoride fluxes were created, a technological process of furnace brazing of thin-walled aluminum waveguide structures in a controlled gaseous medium was developed.

Key words: aluminum, reactive-flux brazing, flux, filler metal, microstructure, brazed joint, corrosion.