

вх. 323  
03 03 2021

## ВІДГУК

офіційного опонента к.т.н. І.І. Габа

на дисертаційну роботу Сабадаша Олега Михайлдовича

### «Технологія реактивно-флюсового паяння тонкостінних конструкцій з алюмінієвих сплавів Al, Al-Mn»

представлену на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - «Зварювання та споріднені процеси і технології»

#### Актуальність обраної теми дисертації

Отримання паяних багатоелементних тонкостінних конструкцій має велике значення в приладобудуванні при виготовленні окремих вузлів і елементів навігаційних приладів з алюмінієм і його сплавів.

Основна складність отримання легких паяних з'єднань з алюмінієвих сплавів полягає в забезпеченні змочування алюмінію, руйнуванні оксидної плівки і отриманні якісних паяних швів великої протяжності ( $\sim 1000$  мм). Відома технологія паяння тонкостінних конструкцій шляхом занурення в сольовий розплав корозійних хлоридно-фторидних флюсів має низку недоліків, які пов'язані зі значними витратами флюсів (маса ванни флюсу 1300-1500 кг після паяння алюмінієвого сплаву загальною площею 1000 м<sup>2</sup>), електроенергії, порушенням хімічного складу рідкого флюсу внаслідок випаровування хімічних сполук, підвищеннем вмісту оксифторидів алюмінію, які негативно впливають на якість паяних з'єднань; забрудненням атмосфери токсичними хімічними сполуками; об'ємів гарячої і холодної води на протязі тривалого часу (5-6 годин); видаленням корозійних залишків флюсів; необхідністю очищення водних стоків від токсичних сполук; утилізацією флюсів, що пов'язано зі значними матеріальними і трудовими затратами.

Тому представлена Сабадашем О. М. робота, що спрямована на розв'язання проблеми отримання тонкостінних легких багатоелементних конструкцій з алюмінієм і його сплавів Al-Mn шляхом застосування корозійно-неактивних флюсів та технології реактивно-флюсового паяння в контролюваному середовищі захисних газів (азот, аргон) є безумовно актуальною.

Про актуальність даної роботи також свідчить її зв'язок з темами фундаментальних та прикладних досліджень, одним з розділів яких було дослідження процесів при паянні алюмінію в однорідному і різнопорідному поєднанні, що виконані в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України починаючи з 2000 р. Дисертант приймав участь у виконанні таких розділів в якості відповідального виконавця.

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 в контролюваному газовому середовищі.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що в роботі

Визначено області стабільних, метастабільних і нестабільних сумішей фторидів на діаграмі плавкості сольової системи K, Al, Si/F та встановлено склади евтектик та їх температури плавлення.

Встановлено, що підвищення 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> призводить до збільшення площин розтікання припою системи Al-Si в 1,6 – 1,8 разів за умови утворення легкоплавкого тонкого (2-4 мкм) шару системи Al-Si на поверхні основного металу.

Виявлено 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.

Встановлено, що найменшою електрохімічною гетерогенністю характеризується різниця потенціалів корозії результатів роботи між

алюмінієвою підкладкою та флюсом KF-AlF<sub>3</sub>-(K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>+AlF<sub>3</sub>), яка не перевищує 0,05В.

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

**Практичне значення** полягає у тому, що розроблені в роботі негіроскопічні фторидні флюси і технологічний процес пічного реактивно-флюсового паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій в контролюваному газовому середовищі пройшли апробацію стосовно виготовлення багатоелементного алюмінієвого тонкостінного хвильоводу при виготовленні радарних антен, що входять до складу навігаційних пристрій. Дослідно-промислові випробування експлуатаційних характеристик паяного виробу в умовах Замовника показали їх відповідність вимогам ТУ.

### **Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях**

Основний зміст дисертаційної роботи Сабадаша О.М. відображену у 25 наукових працях: 5 статей у фахових науково-технічних фахових виданнях України, одна з яких в журналі, що входить до науково-метричної бази «Scopus»; одна стаття в іноземному виданні; 2 розділи в книгах (у т. ч. один в іноземному виданні); 14 у збірниках міжнародних науково-технічних вітчизняних та зарубіжних конференцій (Німеччина, США, КНР, Білорусь); отримано 3 патенти України на винахід.

Висунуті в дисертаційній роботі наукові і практичні положення, зроблені висновки обґрунтовані достатньо переконливо. Достовірність проведених комплексних досліджень підтверджується застосуванням сучасних методів досліджень, значним обсягом експериментальних даних.. Опубліковані роботи повною мірою відображають зміст дисертаций.

Результати роботи доповідались і обговорювались на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях, зокрема «Brazing, High

Temperature Brazing and Diffusion Welding» (1998 р.); «IBSC-2000. Advanced Brazing and Soldering Technologies» (2000); «Пайка, современные технологии, материалы, конструкции: (2001 р.); «2001'IBSC» (2001 р.); «Сварка и родственные технологии в современном мире» (2002 р.); «Пайка в приборостроении и машиностроении. Технология. материалы» (2003 р.); «Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции, опыт эксплуатации паяных конструкций» (2003 р.); «Сварка и контроль 2004» (2004 р.); «Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной пайки» (2004 р.); «Современные методы металлообработки» (2005 р.); «Сварка и родственные процессы в промышленности» (2007 р.); «Сварка и родственные процессы – в третье тысячелетие» (2008 р.).

Автореферат за змістом відповідає дисертаційній роботі та відображає її актуальність, мету та завдання, основні наукові положення, практичну значущість і висновки.

### **Структура та обсяг дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота Сабадаша О. М. складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, 5-ти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та 5 додатків.

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, формулювання мети й задач досліджень. Сформульовано наукову новизну та практичну значимість отриманих в роботі результатів досліджень, відображені особистий внесок автора, а також наведено відомості щодо апробації роботи.

**У першому розділі** викладено загальну характеристику алюмінієвих сплавів, сольових систем хлоридних і фторидних флюсів, аналіз їх фізико-хімічних властивостей та способів високотемпературного паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій,

**У другому розділі** наведено методику досліджень та технічні характеристики обладнання, властивості алюмінієвих сплавів та флюсів.

**У третьому розділі** приведено розрахункові дослідження термодинамічних умов проходження хімічних реакцій в системах Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-фториди. Досліджено температурні умови руйнування оксиду Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та

відновлення кремнію і цинку. Визначено температуру солідусу та ліквідусу сольових розплавів, хімічну взаємодію в системі K, Al, Si/F. Встановлено межі стабільних, метастабільних та нестабільних складів фторидів даної сольової системи.

Експериментально встановлено оптимальні умови отримання флюсів шляхом виплавки та синтезу. Встановлено, що основа плавлених флюсів є суміш сполук  $KAlF_4$  (більше 90 %), залишки  $K_3AlF_6$  та сліди  $K_2AlF_5$ , а основа синтезованих флюсів це сполуки  $KAlF_4$  та  $K_2SiF_6$ .

**У четвертому розділі** представлено особливості взаємодії реактивного флюсу сольової системи  $KF-AlF_3-K_2SiF_6$  з графітовою (нейтральною) і алюмінієвою (реакційною) підкладками при температурі  $605 \pm 3^\circ C$  в аргоні високої чистоти. 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. Встановлено, що при нагріванні на поверхні Al відбуваються два процеси: відновлення кремнію з флюсу і подальше формування рідкого тонкого прошарку системи Al-Si на поверхні Al при контактно-реактивному плавленні. Представлені результати мікрорентгеноспектрального аналізу структури та розподілу елементів в даному прошарку та в паяних швах. Досліджено розтікання припою системи Al-Si по алюмінію і сплаву АМц. Встановлені оптимальні температурно-часові параметри, що забезпечують величину пропаю на рівні 95-100 %. Встановлено формування паяних з'єднань з застосуванням реактивного флюсу без присаджування припою та з припоєм, досліджено мікроструктуру паяних швів. Досліджено механічні властивості паяних з'єднань та корозійну стійкість.

**У п'ятому розділі** проведено узагальнення отриманих результатів досліджень, надано приклади практичного застосування створеного флюсу та розробленого процесу реактивно-флюсового паяння тонкостінних багатоелементних конструкцій з алюмінієвих сплавів. Представлено дані щодо дослідно-промислових випробувань 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. Результати комплексних механічних випробувань паяної конструкції в умовах значних навантажень (зокрема, вібрації в діапазоні частот від 20 до 2000 Гц, ударів з прискоренням до 35 g) показали відповідність механічних характеристик ТУ на паяний виріб.

**У загальних висновках**, що сформульовані в дисертаційній роботі, в повній мірі відображені результати проведених автором досліджень.

Дисертаційна робота виконана на досить високому рівні, її оформлення відповідає необхідним вимогам. Втім, по роботі можна зробити деякі зауваження.

### **Основні зауваження до дисертаційної роботи**

1. Вміст парів води в атмосфері захисних газів (гелій, аргон) впливає на активність флюсів, відповідно, і на площину розтікання припоїв. На жаль, на стор. 104 не вказано марки захисних газів, що ускладнює порівняння результатів площин розтікання припоїв в газовому середовищі на рис. 4.10 і 4.15.
2. На деяких зображеннях мікроструктур (стор. 126, 127 на рис. 4.31 і 4.32) масштабний відрізок бажано було би відкоригувати.
3. При відображені мікроструктур на рисунку 5.9 а, б, в (стор. 147) відсутній масштабний відрізок.
4. У тексті зустрічаються неточності, які краще було би замінити: термін «каплі» (стор. 103) на „краплі”; площину „перетину” (стор. 67) на „перерізу”.
5. Додатки Б, В, Г бажано було би представити на окремих сторінках.

### **Загальний висновок**

Наведені зауваження та недоліки не стосуються кваліфікаційних ознак роботи і не знижують її загального наукового рівня.

В цілому дисертаційна робота Сабадаша Олега Михайловича «Технологія реактивно-флюсового паяння тонкостінних конструкцій з алюмінієвих сплавів Al, Al-Mn» є завершеним науковим дослідженням в області технології високотемпературного реактивно-флюсового паяння алюмінієвих сплавів, яке за обсягом виконаних досліджень, їх новизною,

науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем повністю відповідає вимогам п. 9.11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Сабадаш Олег Михайлович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології».

Офіційний опонент

провідний науковий співробітник

ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України

к.т.н., с.н.с.

I. I. Габ

Підпис провідного наукового співробітника

ІПМ ім. І.М. Францевича

к.т.н., с.н.с. Габа І.І.

засвідчую

Вчений секретар

ІПМ ім. І.М. Францевича, к.ф-м.н.



B. V. Картузов