

07 06 2022

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

кандидата технічних наук, доцента
ПРИСЯЖНОКА Павла Миколайовича,
на дисертацію Ковальчука Петра Васильовича
на тему: «Технологія паяння Ковару в однорідному та різнорідному
сполученні»,
подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»
галузі знань 13 «Механічна інженерія»

Актуальність дисертаційної роботи

Розроблення нових систем легування багатокomпонентних сплавів для високотемпературного паяння сплавів на основі заліза та тугоплавких високоактивних металів за умов досягнення високого рівня фізико-механічними характеристиками паяного з'єднання є комплексною задачею, яка потребує вирішення на стику матеріалознавства із термодинамікою, фізикою твердого тіла, фізичною хімією поверхні, механікою руйнування та ін. і, відповідно, має значне теоретичне значення. Для розроблення технології паяння було обрано важливі, із практичної точки зору, одно- та різнорідні комбінації сплаву *Kovar*® (далі Ковар) та конструкційних матеріалів, які широко використовуються у приладобудування.

Особливо слід зазначити, що дослідження процесу паяння проводилось, зокрема, для з'єднань за участю тугоплавких металів (сплавів на їх основі *Ti*, *Mo*), оскільки відомості щодо технологічних особливостей розроблення сплавів та технологій паяння із їх використанням представлено у науковій періодиці дуже обмежено. Це зумовлено необхідністю подолання ряду методичних та теоретичних труднощів їх дослідження, у тому числі, через високу хімічну активність тугоплавких металів, наслідком якої може бути формування небажаних термодинамічно стабільних фаз та структурних складових на їх основі, що значно знижують рівень фізико-механічних характеристик паяного з'єднання.

Таким чином, дисертаційна робота Ковальчука П. В., у якій вирішується питання розроблення матеріалів та технології для паяння ковару в одно- та різнорідному сполученні є, без сумніву, актуальною.

Ступінь обґрунтованості і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, які представлені до захисту є достатньо повно обґрунтовані, оскільки вони базуються на результатах, отриманих із використанням високоінформативних сучасних та взаємодоповнюючих методів досліджень, зокрема макро- та мікроструктурного аналізу (електронна мікроскопія у поєднанні із енергодисперсійною рентгенівською спектроскопією (EDS)), диференційного термічного аналізу (ДТА), стандартних та оригінальних методик із визначення механічних властивостей та експлуатаційних характеристик. Зразки для досліджень готували шляхом використання сплавів із прецизійно визначеним хімічним складом та лабораторним обладнанням що забезпечує високу відтворюваність результатів експериментів. Інтерпретація результатів досліджень знаходиться у рамках загальноприйнятих теорій та концепцій, щодо формування фазового складу та структури сплавів, змочуваності твердих тіл розплавами, кінетики дифузійних процесів у багатокомпонентних системах та ін.

Обґрунтованість сформульованих наукових положень також підтверджується публікаціями результатів досліджень у рецензованих журналах за профілем дисертації та участю у конференціях відповідного тематичного спрямування.

Наукова новизна отриманих результатів

Серед отриманих наукових результатів, що характеризуються науковою новизною, можна виділити основні наступні:

- визначено особливості змочуваності Ковару, молібдену, титану та корозійностійкої сталі сплавом системи *Cu-Mn-Co* (із вмістом *Co* від 0,5 до 4,5 мас. %) та встановлено, що значення контактного кута змочування знаходяться в межах $5 - 27^\circ$, тоді як значення контактного кута між припоєм марки ПСр72 та коваром становить 11° ;
- визначено, що додавання *Co* до припоїв системи *Cu-Mn* у діапазоні від 0,5 до 4,5 мас. % призводить до підвищення їх міцності на зріз з 374 МПа до 434 МПа для паяних з'єднань Ковар - корозійностійка сталь за витримки протягом 3 хв та зниженні значення міцності з 434 до 248 МПа;
- доведено, що для з'єднань Ковар - Ковар, отриманих шляхом високотемпературного вакуумного паяння, зменшення величини

зазору від 100 до 20 мкм забезпечує підвищення міцності від ~ 297 до ~ 408 МПа, яке супроводжується збільшенням у структурі об'ємної частки фази $(FeMnCo)_x(NiCu)_y$;

- встановлено, що міжфазова границя у паяних з'єднаннях ковар - молібден, отриманих із використанням припою системи $Cu-Mn-4,5Co$, характеризуються наявністю реакційного шару $Mo-Fe$, товщина якого збільшується від 1 до 3 мкм при збільшенні тривалості процесу паяння від 1 до 15 хв.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів

Теоретична цінність отриманих результатів, серед іншого, полягає у визначенні температурних інтервалів кристалізації ряду сплавів системи $Cu-Mn-Co$, які по суті є вихідними даними для розроблення баз даних в рамках енергетичного формалізму М. Хіллєрта закладеного в основу розрахунку фазових діаграм за методом *CALPHAD*. Визначені контактні кути змочування є важливим доповненням до накопичених на даний час довідкових даних щодо змочуваності твердих тіл розплавами, яке полегшує їх систематизацію та дозволяє екстраполювати дані на ширші концентраційні та температурні діапазони. Практичне значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі полягає у розробленні технології високотемпературного вакуумного паяння, готової до промислового використання у приладобудуванні, для ряду типових з'єднань Ковару у одно- та різнорідному виконанні.

Повнота викладу основних результатів та наукових положень дисертації в опублікованих працях

За темою дисертації опубліковано 6 робіт, з котрих 1 стаття в фаховому науковому журналі, що входить до переліку МОН України, в тому числі 2 статті в журналі, який входить до науково метричної бази «SCOPUS», 2 в збірниках наукових праць матеріалів всеукраїнських конференцій та представлено дві презентації на міжнародних науково-технічних конференціях (High Temperature Brazing and Diffusion Bonding. «LÖT 2019» Germany, Aachen 2019), «IBSC 2021, 8-th International Brazing and Brazing Conference» USA: AWS, 2021», отримано патент України винахід.

Структура, оцінка мови, стилю та оформлення

Дисертаційна робота Ковальчука П.В. має класичну структуру та складається із анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (140 найменувань) та чотирьох додатків.

Загальний аналіз змісту дисертації показує повну відповідність спеціальності 132 – Матеріалознавство. Виклад основного матеріалу подано у логічній послідовності, державною мовою із використанням загальноприйнятої термінології. Анотація та текст дисертації оформлено згідно з вимогами чинного «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувачем дотримано вимоги академічної доброчесності, дисертація не містить елементів плагіату та запозичень, фабрикації даних та інших порушень, має посилання на відповідні джерела інформації у випадку використання ідей, результатів та текстів інших авторів. Автор дотримується норм законодавства про авторське право, надає повну і достовірну інформацію щодо використаних методик та матеріалів.

Анотація повністю відображає зміст роботи.

У **вступі** на основі сучасного стану технологій паяння Ковару обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет досліджень, наведено дані про зв'язок роботи із науковим програмами та темами. Представлено дані про опублікування та апробацію результатів дисертації і особистий внесок здобувача.

У **першому** розділі проведено аналітичний огляд літературних джерел щодо властивостей сплаву Ковар, систематизацію та порівняльний аналіз характеристик припоїв, що можуть бути застосовані для його паяння. Проаналізовано особливості виконання різномірних паяних з'єднань за участю ковару та виокремлено фактори, які чинять найбільший вплив на фізико-хімічні характеристики паяних з'єднань. Виділено основні матеріалознавчі аспекти розроблення нових систем легування та нанесення бар'єрних покриттів.

Другий розділ містить дані про хімічний склад та властивості вихідних матеріалів для досліджень, проведений вибір обладнання та режимів для виготовлення дослідних зразків лабораторних методик макро- та мікроструктурних досліджень, змочуваності, а також механічних та експлуатаційних характеристик. Розроблено методику визначення інтервалу плавлення експериментальних сплавів із використанням диференційного термічного аналізу (ДТА).

У **третьому** розділі наведено результати визначення змочуваності ковару та *Ti*-сплаву пропоями систем легування *Cu-Ag*, *Cu-Ag-Sn* та *Ag-Cu-In-Ti*. Встановлено температури ліквідусу та солідусу для дослідних сплавів системи *Cu-Mn-Co*, залежно від вмісту *Co* у концентраційному від 0,5 від 4,5 мас. %. Розглянуті випадки розтікання припоїв різних систем легування при взаємодії з основою супроводжуються порівняльним аналізом високоякісних знімків, отриманими методом електронної

мікроскопії поряд із EDS найбільш важливих ділянок структури з'єднань. Це дозволило визначити оптимальні склади нових припоїв та температурні режими їх використання.

Четвертий розділ присвячено визначенню оптимальних температурно-часових діапазонів, шляхом вивчення впливу тривалості ізотермічних витримок на ширину дифузійної зони та ступінь наближеності фазового складу системи до рівноважного. Наведено результати визначення механічних властивостей, ключових для досягнення необхідних експлуатаційних характеристик та підтверджено перспективність застосування розробленого припою системи *Cu-Mn-Co* із 4,5 мас. % *Co*.

У **п'ятому** розділі описано розроблений технологічний процес паяння для виготовлення виробів конкретної конфігурації, важливих, зокрема, для приладобудування із використанням одно- та різнорідних з'єднань Ковару та визначено їх експлуатаційні характеристики методами неруйнівного контролю.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації

1. Програмне забезпечення для аналізу площі розтікання наведене на с. 51 та с. 75, як засіб для вимірювання не є оптимальним, оскільки процес вимірювання передбачає виділення контуру із урахуванням (кольору) контрасту. Для таких задач більш раціонально застосовувати програмне забезпечення, таке як *ImageJ*, *Image-Pro*, що пристосовано для вирішення матеріалознавчих завдань, пов'язаних із аналізом параметрів форми структурних складових.
2. Як видно із графічних залежностей, які ілюструють концентраційні залежності мікротвердості (рис. 3.15), площі розтікання (рис. 3.22) та міцність на зріз (рис. 4.33) додавання *Co* до сплавів *Cu-Mn* призводить до практично лінійного зростання вказаних характеристик, тому виникає питання із яких міркувань подальше додавання *Co* (понад 4,5 мас. %) не проводилось, наприклад аж до концентрацій еквівалентних масовому вмісту *Mn*, як це, наприклад, має місце у марганцевих мельхіорах системи *Cu-Mn20-Ni20*.
3. У пункті 3 наукової новизни вказано, що при зменшенні зазору з 100 до 20 мкм має місце збільшення об'ємного вмісту фази $(\text{FeMnCo})_x(\text{NiCu})_y$, проте із тексту дисертації не зовсім зрозуміло в яких межах змінюються стехіометричні коефіцієнти x та y .
4. Рисунок 5.3, на якому є знімок оснастки для збирання та паяння макетних зразків не містить позначень складальних одиниць даної оснастки та, при посиланні на нього, немає деталізації щодо принципу її роботи.

Загальний висновок та оцінка роботи

Дисертаційна робота Ковальчука Петра Васильовича на тему «Технологія паяння Ковару в однорідному та різнорідному сполученні» є оригінальним, самостійним та завершеним науково-прикладним дослідженням, виконаним на високому рівні та оформленим згідно із діючими вимогами. Автор суттєво розширив уявлення та вирішив ряд практичних завдань що стосуються вибору матеріалів та технологічних параметрів паяння Ковару в одно- та різнорідному сполученні. При цьому результати роботи повною мірою опубліковані у фахових виданнях.

Вважаю, що дисертаційна робота Ковальчука П.В. на тему а тему «Технологія паяння Ковару в однорідному та різнорідному сполученні» за рівнем актуальності та широкого спектру розглянутих задач, обсягом проведених досліджень, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів відповідає галузі знань 13 – Механічна інженерія та спеціальності 132 – Матеріалознавство, та усім вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор Ковальчук Петро Васильович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри зварювання
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу
МОН України

Прийнято

Павло ПРИСЯЖНЮК

Павло Присяжнюк
06.06.22