УДК 621.791.3

DOI: https://doi.org/10.37434/as2020.03.05

ПАЯННЯ – ПЕРСПЕКТИВНИЙ МЕТОД ОТРИМАННЯ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ

С.В. Максимова

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

В роботі представлено практичні результати розробок і досліджень в області паяння різних матеріалів: алюмінієвих, мідних, жароміцних нікелевих і титанових, а також перспективних матеріалів на основі інтерметалідів Ni_3Al та γ-TiAl, сталей різних марок. Приведено дані з реактивно-флюсового паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій в контрольованому газовому середовищі. Велика увага приділена отриманню паяних з'єднань з різнорідних матеріалів: Mo+C (нержавіюча сталь), W+Cu, твердосплавний матеріал (ВК 20)+сталь, Al+сталь та інші. Показано ефективне застосування створених технологічних процесів паяння жароміцних нікелевих та титанових сплавів при виготовленні відповідальних конструкцій високотемпературного призначення, результати механічних випробувань паяних з'єднань. Створені припої і технологічні процеси високотемпературного вакуумного паяння застосовані при отриманні з'єднань зі сплавів нового покоління на основі алюмінідів нікелю та титану, які успішно пройшли випробування на довготривалу міцність в умовах підвищеної температури і постійно діючих напружень. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 14.

Ключові слова: паяні з'єднання, припої, вакуумне, реактивно-флюсове, газополуменеве паяння, жароміцні нікелеві, титанові сплави, довготривала міцність, різнорідні матеріали, алюмінієві, мідні сплави

На сьогоднішній день паяння займає важливе місце серед різних методів отримання нероз'ємних з'єднань і знаходить широке застосування в різних галузях промисловості: авіаційній, космічній, приладобудуванні, автомобілебудуванні при виготовленні холодильної та кріогенної техніки, на ювелірних підприємствах та ін. [1, 2]. Переваги паяння перед зварюванням полягають в можливості поєднання різних матеріалів без їх розплавлення, що забезпечує збереження вихідної структури основного металу за умови правильно вибраних температурно-часових параметрів технологічного процесу паяння і хімічної композиції припійного матеріалу. Важливе значення має застосування процесу паяння при з'єднанні матеріалів, які характеризуються незадовільною зварюваністю, через утворення тріщин в зоні термічного впливу та зварному шві [3]. Ще одним фактором на користь паяння є можливість поєднання режиму термічної обробки основного металу з термічним режимом паяння та автоматизацією з одночасним отриманням декількох елементів складної геометричної конфігурації [4]. Вирішальним фактором при паянні є можливість отримання з'єднань у важкодоступних ділянках, в яких неможливо з'єднувати основні матеріали традиційними методами зварювання. В таких випадках паяння є єдино можливим методом отримання з'єднань.

Разом з тим за наявності таких позитивних характеристик процесу паяння існують свої особливості і проблеми, які необхідно вирішувати з метою забезпечення експлуатаційних властивостей паяних конструкцій. До них відноситься хімічний склад і форма припою, що використовується. Наразі існує безліч припоїв на різних основах: олов'яній, алюмінієвій, мідній, срібній, нікелевій, титановій, залізній та ін. Застосовують їх в литому стані, у вигляді порошків, дротів різних діаметрів, пластичних стрічок, що отримані традиційними методами металургійної переробки або шляхом надшвидкого гартування та ін. [4, 5]. Вибір хімічного складу припою обумовлений фізико-хімічними властивостями основного металу і експлуатаційними характеристиками паяних виробів. Одним з показників сумісності припою з основним металом є здатність припою змочувати основний метал і розтікатись по його поверхні при температурі паяння [6, 7]. Застосування припоїв з широким інтервалом плавлення призводить до розвитку хімічної неоднорідності та ліквацій-них процесів в металі шва, а також до виникнення пористості. Застосування евтектичних припоїв забезпечує кристалізацію металу паяного шва при постійній температурі, але при цьому формується евтектична структура, яка часто сприяє окрихченню металу паяного шва. Тому кожна пара матеріалів, яку потрібно паяти, потребує індивідуального підходу і конкретного хімічного складу припою з заданим температурним інтервалом і механічними властивостями.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України на протязі багатьох років проводять систематичні дослідження в області паяння, вивчають фізико-хімічні процеси, що протікають при нагріві до температури паяння, досліджують взаємозв'язок між механічними властивостями паяних з'єднань, структурою паяних швів, хімічним складом припою і основного металу. На базі ре-

Максимова С.В. – https://orcid.org/0000-0003-0158-5760
© С.В. Максимова, 2020

зультатів досліджень створено припої, які сумісні з основним металом, розроблено технологічні процеси паяння, що забезпечують паяним з'єднанням необхідні експлуатаційні властивості. В даній роботі представлено деякі результати проведених досліджень і приклади практичного застосування в різних галузях промисловості.

Алюмінієві паяні з'єднання. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено технологію паяння алюмінієвих сплавів і запропоновано метод пічного паяння алюмінієвих тонкостінних конструкцій (рис. 1) у контрольованому газовому середовищі (азот, аргон). Даний метод є екологічно безпечним і менш енергоємним в порівнянні з наявними методами паяння (наприклад, зануренням в сольові розплави).

Для високотемпературного паяння алюмінієвих сплавів серій 1000 ((90,3...99,98)Al) та 3000 (системи Al–Mn) використовуються припої системи Al–Si та негігроскопічний реактивний флюс сольової системи K,Al,Si/F, що забезпечують рівноміцність паяним з'єднанням в умовах багаторазових ударів, вібрації згідно ТУ У 14307274-009:2016.

Температура плавлення припою та флюсу має бути нижчою за температуру солідусу алюмінієвого сплаву, що паяється, що і визначає верхню межу температурного інтервалу паяння. Виготовлено антенні решітки габаритних розмірів (640×640×26 мм). Маса антени складає 2,07 кг. Слід зазначити, що при виготовленні даної антени необхідно отримати паяні шви довжиною біля 6000 мм. При цьому витрати флюсу незначні і становлять ≤ 50 г, що вигідно відрізняє вартість даного методу в порівнянні з існуючими.

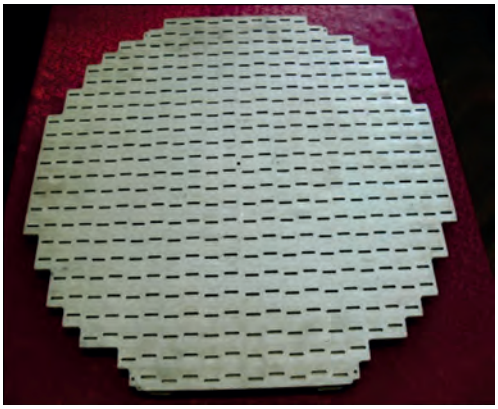

Рис. 1. Загальний вигляд паяної антенної решітки

Виготовлені в контрольованому газовому середовищі тонкостінні алюмінієві хвильоводи (рис. 2) характеризуються значною загальною площею паяного з'єднання, що становить близько 1562 мм^2. При цьому витрати припою на одиницю виробу складають 1,1….1,5 г, флюсу – 2…3 г.

Отриманий паяний шов тонкостінної конструкції характеризується наявністю плавної галтелі, відсутністю дефектів (рис. 2, б).

Технологічний процес реактивно-флюсового паяння застосовується при виготовленні пластинчастих алюмінієвих теплообмінників електротермічного модуля рухомого складу на залізниці, що використовується для підготовки води, елементів НВЧ антен та ряду інших виробів народного господарства (рис. 3).

Габаритні розміри таких теплообмінників 145×160×82 мм, кількість пластин налічує 82 штуки і сумарна площа паяного з'єднання становить 1740 мм^2. Витрати флюсу незначні і становлять ≤ 20 г.

В даному випадку паяння протікає із застосуванням реактивного фтористого флюсу, який при нагріванні до температури паяння розплавляється, взаємодіє з алюмінієм і утворює рідку фазу системи Al-Si, що близька до евтектичного складу і слугує припоєм [8]. Отримані паяні з'єднання характеризуються наявністю паяних швів, ширина яких значно менша за ширину швів, що отримані із застосуванням флюсу з припоєм (рис. 4).

Різнорідні паяні з'єднання. Вибір і використання різнорідних металів в якості конструкційних матеріалів визначається експлуатаційними вимогами, економічними показниками, що пред'являються до готових виробів. Більшість високотехнологічного обладнання вміщує окремі вузли з різнорідних матеріалів, які отримують шляхом паяння. Слід відмітити, що при паянні різнорідних матеріалів виникають проблеми, що обумовлені різними фізико-хімічними властивостями основ-

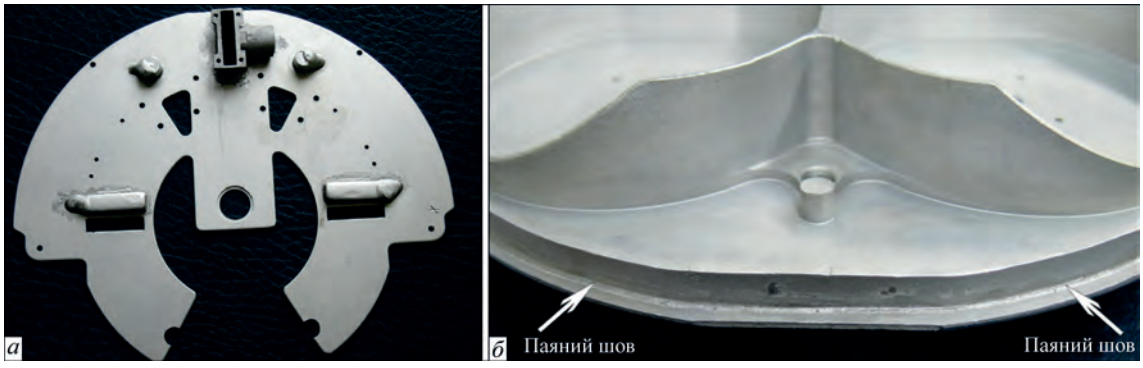

Рис. 2. Зовнішній вигляд тонкостінного алюмінієвого хвильоводу (*а*), паяний шов по периметру конструкції (*б*)

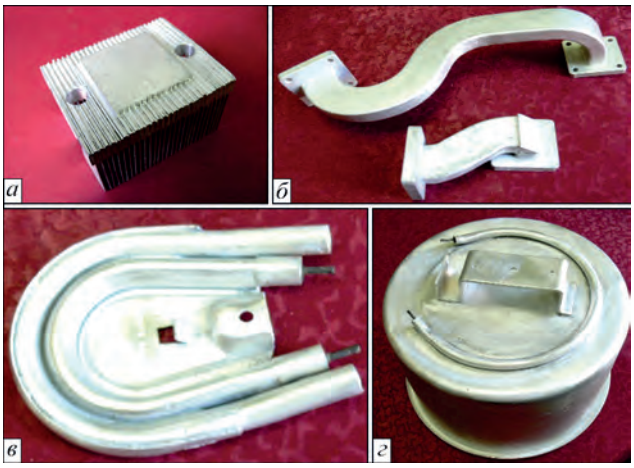

Рис. 3. Паяні вироби з алюмінієвих сплавів: *а* – пластинчастий алюмінієвий теплообмінник; *б* – елемент модуля надвисокої частоти; *в* – нагрівальні елементи – тени для побутової техніки (*г*)

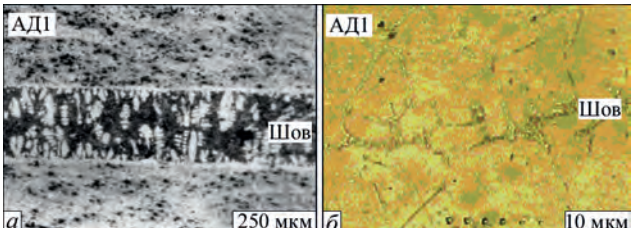

Рис. 4. Мікроструктура паяного шва алюмінієвого паяного з'єднання, що отримане з застосуванням припою і флюсу (*а*) та з флюсом без припою (*б*)

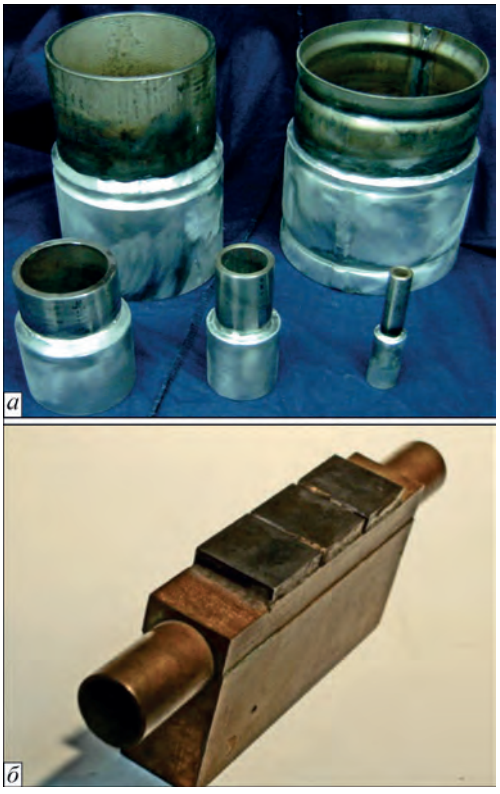

Рис. 5. Паяні трубні сталево-алюмінієві перехідники (*а*) та паяна модель вузла дивертора Cu–W для термоциклічних випробувань (*б*)

них матеріалів. Суттєво впливає на якість паяних з'єднань різниця в коефіцієнтах термічного розширення, що сприяє появі внутрішніх напружень. Зменшенню впливу внутрішніх напружень забезпечує правильний вибір складу припою та температурно-часових параметрів процесу паяння.

Розроблена технологія флюсового індукційного паяння трубних сталево-алюмінієвих перехідників (ТСАП) з прохідним діаметром (10…300 мм) в середовищі аргону (для криогенної техніки). Оскільки коефіцієнти термічного розширення основних різнорідних матеріалів (корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т та алюмінієвого сплаву серії 3000 (АМц)) відрізняються, то при паянні виникають залишкові напруження в паяному з'єднанні. Їх рівень значно менший порівняно зі зварними з'єднаннями, що отримані наявними методами дугового зварювання. Паяні трубні сталево-алюмінієві перехідники (рис. 5, *а*) успішно випробувано згідно вимог ТЗ за міцністю та герметичністю.

Отримані результати термоциклічних випробувань показують, що в умовах робочого тиску 1 МПа/см^2 паяні трубні сталево-алюмінієві перехідники витримають 50 циклів при зміні температури від 35 до –196 °С зі збереженням герметичності та без руйнування. Вони характеризуються високою міцністю, що становить 0,95…0,98 від міцності сплаву АМц.

Особливий інтерес і значні труднощі представляє паяння пари різнорідних матеріалів мідь–вольфрам, які знаходять застосування при виготовленні плазмотронів, потужних рентгенівських трубок, окремих вузлів дивертора термоядерного синтезу та ін. На основі систематичних досліджень розроблено технологічний процес вакуумного паяння різнорідних з'єднань мідь – вольфрам, що призначені для використання в жорстких умовах термоциклічного навантаження і нейтронного опромінення. Для проведення таких випробувань виготовлено шляхом паяння моделі диверторів мідь–вольфрам (рис. 5, б). Під дією пульсуючого теплового потоку в моделі виникає нерівномірний розподіл температури. Потужність теплового потоку і тривалість його дії визначали таким чином, щоб максимальна температура на поверхні вольфрамового покриття і в зоні паяного шва на межі з мідною основою відповідала температурі конструкції при постійному потоці потужністю Q = 10 МВт/м^2. Результати термоциклічних випробувань показали хороші термовтомні властивості на базі $1 \cdot 10^3$ циклів (таблиця).

Після нейтронного опромінення дозою $5 \cdot 10^{21}$ нейтр/см^2 при температурі 100 °С спостерігається підвищення міцності на розтяг стикових паяних

Результати термоциклічних випробувань паяних моделей дивертора Cu–W

Тип навантаження	Тривалість імпульсу/паузи, с	Потужність теплового потоку, МВт/м^2	Кількість циклів N
1	0,3/18…25	26…28	1000
2	0,5/26…28	26…28	200
3	10/13	13/14	1000

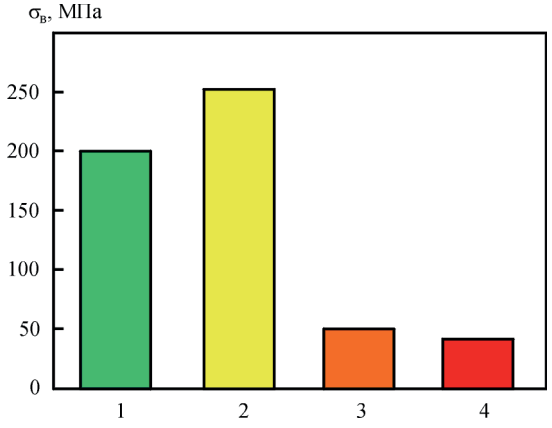

Рис. 6. Міцність паяних з'єднань Cu–W: у вихідному стані після паяння (1); після нейтронного опромінення в реакторі СМ-2 при T = 100 °С і дозі $5\cdot10^{21}$ нейтрон/см^2 (2); при T = 310 °С, реакторі СМ-2, дозі $5\cdot10^{21}$ нейтрон/см^2 (3); в реакторі БОР-60 при T = 400 °С, дозі $5\cdot10^{22}$ нейтрон/см^2 (4)

них з'єднань з 200 (у вихідному стані після паяння) до 250 МПа, що пов'язано з процесами упорядкування твердого розчину в паяному шві, зразки зберігають достатню міцність і при 400 °С (рис. 6).

Створено технологічний процес вакуумного високотемпературного паяння різнорідних з'єднань молібден – вуглецеві сплави (нержавіюча сталь), які роботоздатні в жорстких умовах теплових навантажень (рис. 7, *а*, *б*).

Отримано паяні трубчаті з'єднання молібден–нержавіюча сталь з щільними паяними швами, в яких відсутні тріщини і сформована структура твердого розчину (рис. 7, *в*).

Різнорідні з'єднання ковар–титановий сплав знаходять широке застосування в приладобудуванні. Для їх отримання шляхом паяння розроблено спеціальну технологію попередньої обробки основного металу (титанового сплаву) та з застосуванням радіаційного нагріву у вакуумі виготовлено окремі паяні вузли (рис. 8). Проведені випробування на герметичність дали позитивні результати і свідчать про якісне формування паяних швів.

Відпрацьовано флюсове паяння твердосплавних пластин до дисків пил і державок при виготовленні дискових пил для деревообробного та металообробного інструменту.

Процес паяння застосовується при виготовленні циліндричних елементів для напівпровідникових пристроїв, що складаються з різнорідних матеріалів, таких як металізована кераміка 22ХС та ковар (або мідь).

Освоєно паяння різнорідних матеріалів твердосплавних різців до лопатей корпусу (зі сталі) при виготовленні бурових доліт [9]. Окрім того, під час експлуатації доліт відбувається часткове руйнування поверхні твердосплавних різців та спостерігаються сколи (рис. 9, *а*), що знижує їх роботоздатність.

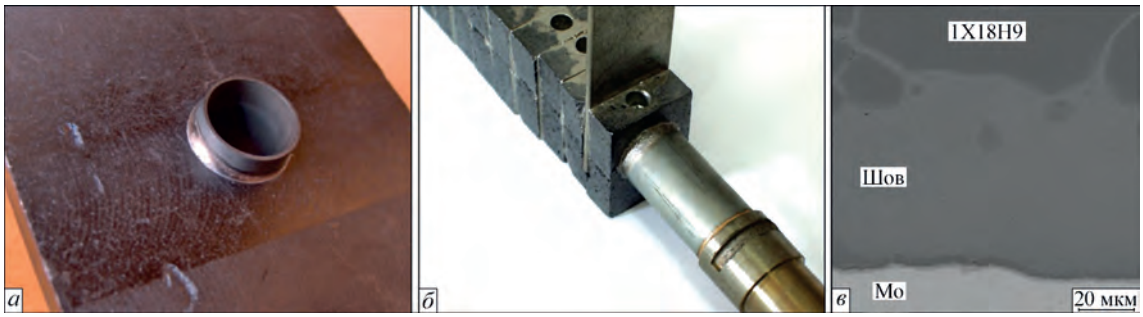

Рис. 7. Паяний вузол графіт–молібден (*а*) та модель дивертерного пристрою (*б*), що містить паяні елементи Mo–C (нержавіюча сталь) для термоциклічних випробувань, які отримано шляхом вакуумного високотемпературного паяння; мікроструктура паяного з'єднання молібден–нержавіюча сталь (*в*)

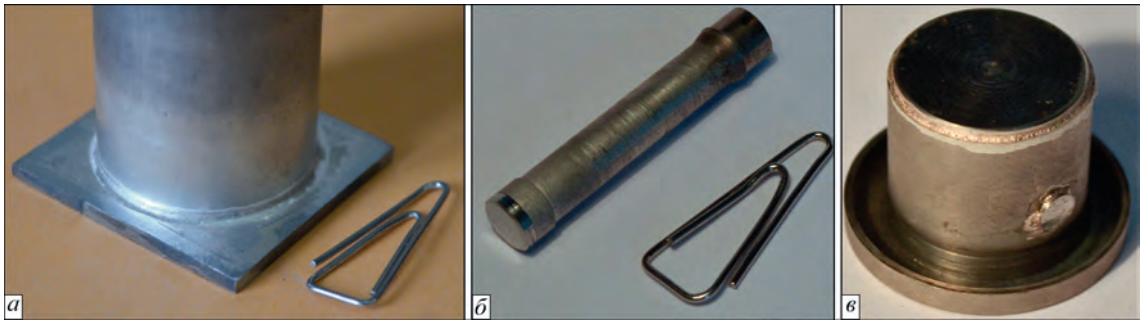

Рис. 8. Паяні зразки різнорідних матеріалів ковар–титановий сплав: модельний зразок для випробувань на герметичність (*а*); трубчатий елемент (*б*); паяний вузол з заглушкою (*в*)

Рис. 9. Матричне долото діаметром 215,9 мм для поверхневого буріння при видобутку нафти та газу до (*а*) та після ремонту (*б*)

Тому виникає потреба в реставрації дефектів і проведенні ремонтних робіт шляхом флюсового паяння різнорідних матеріалів сталі з твердосплавними різцями, а також в застосуванні міцних карбідовмістких покриттів. Це дозволяє продовжувати буріння відновленим буровим інструментом (рис. 9, *б*) зі значним заощадженням матеріальних ресурсів.

Паяння міді таі її сплавів. Розроблено припої на базі системи мідь–фосфор, відпрацьовано флюсове і вакуумне паяння (ремонт) мідних сплавів, в тому числі бронз різних марок (дисперсійно-твердіючих типу БрХЦр), дисперсно-зміцнених сплавів (типу Glidcop 0,25 Al_2O_3), мельхіорів (МНЖМц31-1), куніалей (Cu–Ni–Al), нейзільберів (МНЦ15-20) та ін. Корозійностійкі мельхіори застосовують при виготовленні установок для опріснення морської води, медичного інструменту, в морському суднобудуванні.

При виробництві холодильного та теплообмінного (рис. 10, *б*) устаткування використовують капілярне паяння мідних трубопроводів. Теплообмінники (з міді, мельхіору – МНЖМц31-1) використовують у суднобудуванні.

В тепловозобудуванні та при виготовленні газових колонок застосовують теплообмінники (рис. 10, *б*), складовими яких є паяні елементи з міді (або латуні). Проведені дослідження міцності паяних з'єднань з міді М3 та зі сплавів МНЖ-5-1 та МНЖМц 30-1-1 при статичних і циклічних навантаженнях дали позитивний результат і забезпечили надійну роботоздатність телескопічних та раструбних трубчатих конструкцій.

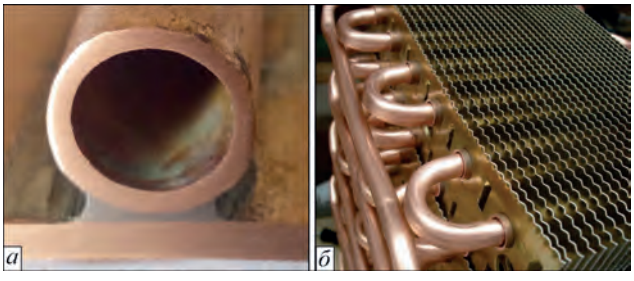

Рис. 10. Паяний елемент сонячного колектору (*а*) та теплообмінник (*б*)

Мідно-фосфорними припоями паяють мідні з'єднання, які складаються з трубчатих елементів і пластин, що використовують в сонячних колекторах для нагріву води (рис. 10, *а*) Сонячні колектори – це відмінний спосіб для заощадження енергоресурсів. Завдяки безкоштовній сонячній енергії можна на протязі (як мінімум) 6–7 місяців на рік забезпечувати теплу воду для господарських потреб, а в інші місяці ще й допомагати системі опалення [10]. При виготовленні сонячних колекторів можна також застосовувати технологічний процес паяння стальних комплектуючих.

При паянні мідних трубчатих конструкцій ефективно можна застосовувати різні методи нагріву, в тому числі газополуменевий, дуговий або плазмовий, де в якості присадного матеріалу використовуються мідно-фосфорні припої з додатковим легуванням різними елементами.

Високотемпературне вакуумне паяння жароміцних нікелевих сплавів. Створення нероз'ємних паяних з'єднань при виготовленні конструкцій відповідального призначення з жароміцних нікелевих ливарних, дисперсійнотвердих, інтерметалідних сплавів на основі Ni_3Al, що експлуатуються при високих температурах, на сьогодні є важливим завданням та її вирішення визначає можливість використання даних матеріалів при виготовленні деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів, енергетичних установок, реактивних двигунів, теплотехнічного обладнання.

Для паяння нікелевих жароміцних сплавів широко застосовуються промислові припої на основі нікелю, в яких депресантами є кремній та бор. Дані елементи з одного боку знижують температуру плавлення і покращують розтікання, а з іншого, утворюють легкоплавкі крихкі (евтектичні) фази в паяних швах і в основному матеріалі [11–13], які неможливо розчинити навіть при тривалій ізотермічній витримці, що негативно впливає на механічні властивості паяних з'єднань при тривалій експлуатації в умовах підвищеної температури і постійно діючих напружень. Використання припоїв, що містять срібло, мідь, нікель, не забезпечує необхідний рівень жароміцності.

У зв'язку з цим проведені фундаментальні дослідження фізико-металургійних процесів, що протікають під час високотемпературного вакуумного паяння жароміцних дисперсійно-твердих нікелевих сплавів (IN 718), визначені закономірності структуроутворення паяних з'єднань. Встановлено, що отримання однофазної структури паяного шва забезпечує стабільні результати короткочасної міцності паяних з'єднань при кімнатній і підвищеній (550 °С) температурі, відповідно (рис. 11, *а*), а також високі показники довготри-

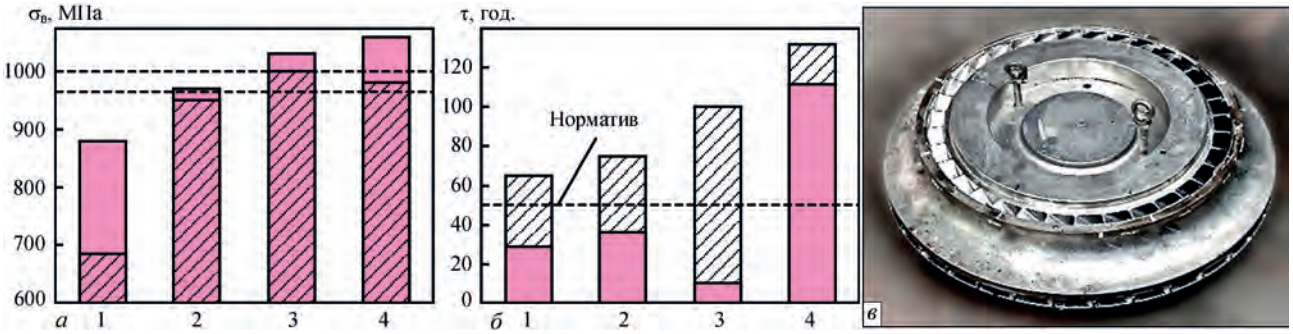

Рис. 11. Міцність на розтяг стикових паяних з'єднань (*а*), що отримані з застосуванням припоїв систем: Ni–Pd–Cr–Si (1); Ni–Pd–Cr–Co–Si (2); Ni–Pd–Cr–B (3); Ni–Pd–Cr–Ge (4); довготривала міцність (*б*); закрите відцентрове колесо осьового компресора газотурбінного двигуна (*в*)

валої міцності (132 год без руйнування) при температурі 550 °С і заданих напруженнях 785 МПа (рис. 11, *б*). Отримані дані довготривалої міцності перевищують більше ніж в 2 рази аналогічні дані, що отримані при застосуванні промислового припою. Дана технологія застосована при виготовленні закритого відцентрового колеса (рис. 11, *в*).

Паяння інтерметалідних сплавів. На сьогоднішній день можливості традиційних металевих сплавів з твердорозчинним і карбідним зміцненням практично вичерпані з точки зору радикального покращення властивостей, особливо для високотемпературного застосування. Деякий резерв на найближче майбутнє складають дисперсно-зміцнені, монокристалічні, евтектичні сплави. Підвищення температури в газотурбінних двигунах досягається за рахунок інтенсивного охолодження лопаток, що, в свою чергу призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії. Реальною альтернативою металевим сплавам є сплави на основі інтерметалідів, які призначені для високотемпературного застосування і сприяють розширенню області використання охолоджуваних лопаток із забезпеченням високої жароміцності без застосування покриття [14].

Створено припої та технологічний процес вакуумного високотемпературного паяння (ремонту) жароміцних нікелевих сплавів різних марок: ливарних сплавів (ЖС6У), перспективних жароміцних нікелевих сплавів на основі інтерметаліду Ni_3Al (Ni–8Al–14Mo–0,05B), що експлуатуються в умовах високої температури, агресивного середовища і постійно діючих навантажень. Їх використовують для виготовлення окремих деталей і вузлів в гарячих трактах газотурбінних двигунів (рис. 12, *а*, *б*). Отримані паяні з'єднання з нікелевого сплаву на основі Ni_3Al харавктеризуються високою довготривалою міцністю в умовах підвищеної температури – 900 °С і постійно діючих напружень 150 МПа (рис. 12, *в*).

До класу перспективних інтерметалідних сплавів належать титанові сплави на основі TiAl. Вони є яскравими представниками високоміцних і жароміцних інтерметалідних сплавів нового покоління, які перспективні для використовування в авіабудуванні при виготовленні ряду деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів. За жароміцними характеристиками при температурі 700…750 °С вони можуть конкурувати з високолегованими нікелевими сплавами завдяки низькій питомій вазі 3,8 г/см^3 (8,9 г/см^3 у нікелю). Це дозволить зменшити масу газотурбінного двигуна на 30 % і підвищити експлуатаційні характеристики. Класичним прикладом інтерметалідних титанових сплавів можна назвати Ti–48Al–2Cr–2Nb (ат. %), основною структурною складовою якого є упорядкована γ-фаза (TiAl), по межах якої виділяється незначна кількість α_2-фази (Ti_3Al) у вигляді пластинчастих зерен. Завдяки такій шаруватій структурі даний сплав має хороший баланс

Рис. 12. Газотурбінний двигун (*а*), лопатка (*б*), довготривала міцність стикових однорідних паяних з'єднань Ni_3Al+Ni_3Al, що отримані з застосуванням багатокомпонентного нікелевого припою без термічної обробки (1), з термічною обробкою (2) та різнорідних з'єднань Ni_3Al+ЖС6У з термічною обробкою (3) (*в*)

пластичності при кімнатній температурі, міцність при високій температурі і стійкість до окислення. Сплави, в яких об'ємна частка α_2-фази знаходиться на рівні 10…15 %, мають максимальний рівень пластичності [15]. Сплав γ-TiAl (47XD) має високу міцність як при кімнатній температурі (650…700 МПа), так і при підвищеній (при 700 °С, 320…350 МПа).

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона проведено дослідження по з'єднанню інтерметалідних титанових сплавів на основі γ-TiAl (Ti–45Al–2Nb–2Mn + + 0,8 об. % TiB_2) із застосуванням вакуумного нагріву і адгезійно-активних припоїв на базі системи титан–цирконій [16]. Отримані з'єднання успішно пройшли механічні випробовування на міцність при кімнатній, підвищеній температурі і показали хорошу довготривалу міцність при підвищеній температурі та постійно діючому напруженні.

Паяння нержавіючої сталі. Конструкції з нержавіючої сталі часто експлуатуються в умовах агресивних середовищ і підвищеної температури. Відпрацьовано технологічний процес вакуумного паяння нержавіючої сталі стосовно тонкостінних виробів: рулів ракет, гранчастих конструкцій [17], автомобільних теплообмінників (рис. 13).

Автомобільні теплообмінники з нержавіючої сталі (рис. 13, *в*, *г*) призначені для підтримки оптимального температурного режиму в автомобілях, тракторах, комбайнах та інших машинах.

В промисловості широко застосовуються паяні вузли зі сталей різних марок. Процес паяння можна виконувати у вакуумі, в середовищі захисних газів та на повітрі. Прикладом є паяний вузол з високоміцної аустенітної сталі і заглушок із сталі 45 (рис. 14), що характеризуються рівноміцністю та застосовується в лабораторному стенді

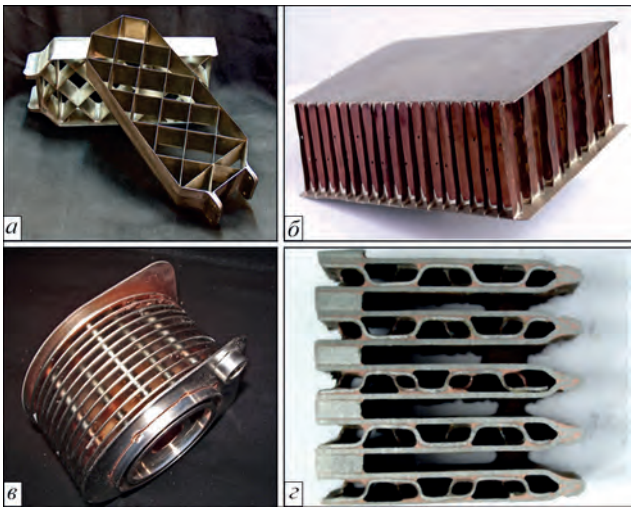

Рис. 13. Паяні тонкостінні конструкції з нержавіючої сталі: рулі ракет (*а*); пластинчатий теплообмінник (*б*); масляний радіатор для автомобільної промисловості: зовнішній вигляд (*в*) та вертикальний переріз (*г*)

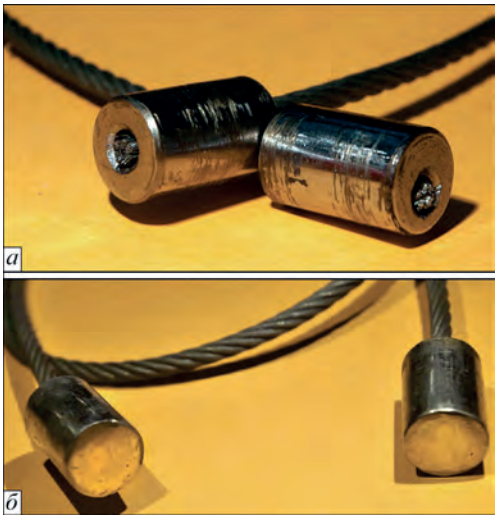

Рис. 14. Паяні елементи з високоміцної аустенітної сталі і сталі 45 до (*а*) та після паяння (*б*)

для випробування конструкцій рухомого складу (вагонів) на залізничному транспорті.

На особливу увагу заслуговують експерименти з паяння в космічному просторі: в умовах невагомості і значного перепаду температури, що впливають на процес утворення паяних з'єднань та суттєво відрізняються від земних умов. В цьому напрямку зроблено тільки перші кроки, а для більш детального вивчення фізико-металургійних особливостей формування паяних з'єднань необхідно проведення подальших систематичних досліджень.

Висновки

В даній роботі коротко висвітлено деякі аспекти практичного застосування результатів досліджень і створених науково-технічних розробок в області паяння різних матеріалів: алюмінієвих, мідних, стальних, жароміцних нікелевих, титанових сплавів і перспективних матеріалів нового покоління на основі інтерметалідів Ni_3Al та γ-TiAl. Особливо слід відмітити значний об'єм експериментальних досліджень при отриманні паяних з'єднань, що призначені для експлуатації в жорстких умовах високої температури і постійно діючих напружень. Показано приклади застосування паяних з'єднань з різнорідних матеріалів, що відрізняються за фізико-хімічними властивостями і потребують комплексного підходу при виборі (розробці) хімічного складу припою і технологічного процесу паяння. Приведені в роботі практичні рішення мають велике значення для багатьох галузей промисловості та розширюють область застосування паяних конструкцій.

Список літератури

1. Краснопевцева И. В. (2018) Технико-экономические преимущества применения технологии пайки в машиностроении. *Пайка – 2018. Сборник материалов международной науч.-техн. конференции*. Тольятти, ТГУ, сс. 30–36.
2. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів. Підручник*. Хорунов В.Ф., Квасницький В. Ф. (редактори). Миколаїв, НУК.

3. Малый А.Б. (2008) Улучшение свариваемости сплава на никелевой основе ЧС-104 путем оптимизации режима термической обработки. *Автоматическая сварка*, **8**, 11–14.
4. Калин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н. и др. (2005) Разработка и применение быстрозакаленных припоев для прецизионной пайки разнородных материалов атомной техники. *Вопросы атомной науки и техники*, 5(**88**), 150–156.
5. Максимова С.В. (2007) Аморфные припои для пайки нержавеющей стали и титана и структура паяных соединений. *Адгезия расплавов и пайка материалов*, **40**, 70–81.
6. Новосадов В.С. (2018) Физико-химические и реологические закономерности смачивания и растекания в металлических ситемах. *Пайка – 2018. Сборник материалов международной науч.-техн. конференции*. Тольятти, ТГУ, сс. 101–120.
7. Пашков И.Н., Базлова Т.А., Баженов В.Е., Мисников В.Е. (2018) Исследовние краевых углов смачивания припоями на никелевой основе на подложках из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т и жаропрочного сплава ВЖ-159. *Пайка – 2018. Сборник материалов международной науч.-техн. конференции*. Тольятти, ТГУ, сс. 157–165.
8. Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. (2013) Brazing of aluminium and aluminium to steel. Advances in brazing. *In: Science, technology and applications. UK, WPL*, Oxford Cambridge, 249-279.
9. Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Стефанив Б.В. (2010) Изготовление буровых долот для добычи рассеяного метана в шахтных выработках. *Автоматическая сварка*, **6**, 48–51.
10. (2020) https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/1023-delaem-prostoj-solnechnyj-kollektor-svoimi-rukami-poshagovaya-instruktsiya.
11. Rabinkin, A. (2013) Advances in brazing. I*n: Science, technology and applications*. UK, WPL, Oxford Cambridge, 121-159.
12. Малашенко И.С., Куренкова В.В., Белявин А.Ф., Трохимченко В.В. (2006) Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием борсодержащего припоя с присадкой кремния. *Современная электрометаллургия*, **4**, 26–42.
13. Arafina, M.A., Medraja, M., Turnerb, D.P., Bocherc, P. (2007) Transient liquid phase bonding of Inconel 718 and Inconel 625 with BNi-2: Modeling and experimental investigations. Mater. Sci. & Engin.: A., 447(1-2), 125-133.
14. Каблов Е.Н., Лукин В.И. (2008) Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники. *Автоматическая сварка*, **11**, 76–82.
15. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник.* Москва, ВИЛС-МАТИ.
16. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V. (2013) Brazing of superalloys and the intermetallic alloy (γ-TiAl). Advances in brazing. In: *Science, technology and applications*. WPL, Oxford Cambridge, 85-120.
17. Хорунов В.Ф. (2008) *Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей.* Киев, Наукова думка.

References

1. Krasnopevtseva, I.V. (2018) Technical and economical advantages of application of brazing technology in mechanical engineering. *In: Proc. of Int. Conf. on Brazing -2018*. Tolyatti, TGU, 30-36.
2. Yermolayev, G.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi V.F. et al. (2015) *Brazing of materials: Manual.* Ed. by V.F. Khorunov, V.F.Kvasnytskyi. Mukolaiv, NUK [in Ukrainian].
3. Maly, A.B. (2008) Improvement of ChS-104 nickel-base alloy weldability by optimization of heat treatment mode. *The Paton Welding J.*, **8**, 7-10.
4. Kalin, B.A., Fedotov, V.T., Sevryukov, O.N. et al. (2005) Development and application of rapid quenched filler metals for precision brazing of dissimilar materials of nuclear engineering. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, 5(**88**), 150-156 [in Russian].
5. Maksymova, S.V. (2007) Amorphous filler metals for brazing of stainless steel and titanium and structure of brazed joints. *Adgeziya Rasplavov i Pajka Materialov*, **40**, 70-81 [in Russian].
6. Novosadov, V.S. (2018) Physicochemical and rheological principles of wetting and flowing in metallic systems. I*n: Proc. of Int. Conf. on Brazing -2018. Tolyatti*, TGU, 101-120.
7. Pashkov, I.N., Bazlova, T.A., Bazhenov, V.E., Misnikov, V.E. (2018) Study of limiting wetting angles with nickel-based brazing filler metals on substate from corrosion-resistant steel 12Kh18N10T and heat-resistant alloy VZh-159. *In: Proc. of Int. Conf. on Brazing -2018*. Tolyatti, TGU, 157-165.
8. Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. (2013) Brazing of aluminium and aluminium to steel. Advances in brazing. *In: Science, technology and applications*. UK, WPL, Oxford Cambridge, 249-279.
9. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V., Stefaniv, B.V. (2010) Manufacture of drill bits for production of dispersed methane in mine working. *The Paton Welding J.*, 6, 41-43.
10. (2020) https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/1023-delaem-prostoj-solnechnyi-kollektor-svoimi-rukami-poshagovaya-instruktsiya.
11. Rabinkin, A. (2013) Advances in brazing. *In: Science, technology and applications*. UK, WPL, Oxford Cambridge, 121-159.
12. Malashenko, I.S., Kurenkova, V.V., Belyavin, A.F., Trokhimchenko, V.V. (2006) Short-term strength and microstructure of brazed joints of alloy VJL12U produced using boron-containing brazing alloy with addition of silicon. *Advances in Electrometall*, **4**, 23-38.
13. Arafina, M.A., Medraja, M., Turnerb, D.P., Bocherc, P. (2007) Transient liquid phase bonding of Inconel 718 and Inconel 625 with BNi-2: Modeling and experimental investigations. *Mater. Sci. & Engin.*: A., 447(1-2), 125-133.
14. Kablov, E.N., Lukin, V.I. (2008) Intermetallics based on titanium and nickel for advanced engineering products. *The Paton Welding J.*, 11, 65-70.
15. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
16. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V. (2013) Brazing of superalloys and the intermetallic alloy (γ-TiAl). Advances in brazing. *In: Science, technology and applications.* WPL, Oxford Cambridge, 85-120.
17. Khorunov, V.F. (2008) *Fundamentals of brazing of thin-walled structures from high-alloyed steels*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

BRAZING AS A PROMISING METHOD OF PRODUCING PERMANENT JOINTS

S.V. Maksymova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents practical results of developments and investigations in the field of brazing various materials: aluminium, copper, high-temperature nickel and titanium alloys, as well as promising materials based on Ni3Al and ~-TiAl intermetallics, and steels of different grades. Data on reactive-flux brazing of aluminium thin-walled structures in a controlled gas environment are given. A lot of attention is paid to producing brazed joints from dissimilar materials: Mo+C (stainless steel), W+Cu, hard alloy material (VK 20)+steel, Al+steel, etc. Effective application of the developed technologies of brazing high-temperature nickel and titanium alloys in fabrication of critical structures for high temperature applications and results of mechanical testing of brazed joints are shown. The developed brazing filler metal and technologies of high-temperature vacuum brazing were applied to produce joints from new generation alloys based on nickel and titanium aluminides, which have been successfully tested for long-term strength under the conditions of higher temperature and continuously applied stresses. 17 Ref., 1 Tabl., 14 Fig.

Keywords: brazed joints, brazing filler metals, vacuum, reactive-flux, gas-flame brazing, high-temperature nickel, titanium alloys, long-term strength, dissimilar materials, aluminium, copper alloys

Надійшла до редакції 11.02.2020