

## ДИФУЗІЙНЕ З'ЄДНАННЯ СПЛАВУ Ti6-4 ЧЕРЕЗ БАГАТОШАРОВІ ПРОШАРКИ ЕВТЕКТИЧНОГО СКЛАДУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ Ti–Cu

Т.В. Мельниченко, А.І. Устїнов, О.Ю. Клепко, О.В. Самофалов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: melnychenko21@ukr.net

У роботі досліджено закономірності дифузійного з'єднання титанового сплаву Ti6-4 з використанням проміжних багатошарових прошарків евтектичного складу на основі системи Ti–Cu, отриманих методом електронно-променевого осадження в вакуумі. Аналіз мікроструктури та механічних властивостей з'єднань виконано з використанням скануючої електронної мікроскопії та шляхом визначення міцності на зріз. Показано, що проміжні багатошарові прошарки забезпечують отримання бездефектних з'єднань без деградації властивостей титанового сплаву при температурі 920...950 °C, яка відповідає інтервалу плавлення прошарку. Встановлено, що характер реакційної взаємодії компонентів прошарку та сплаву Ti6-4 при нагріванні залежить від температури та інтервалу плавлення проміжного прошарку та визначає мікроструктуру і фазовий склад з'єднання. Відсутність у з'єднанні суцільних шарів інтерметалідів (TiCu, Ti<sub>2</sub>Cu) та формування дисперсної Відманштеттенової структури з вмістом міді та нікелю < 7 ат. % забезпечує міцність з'єднання на рівні сплаву Ti6-4. Бібліогр. 15, табл. 5, рис. 8.

*Ключові слова:* багатошарові фольги, електронно-променеве осадження; сплав Ti6-4; дифузійне з'єднання, мікроструктура, міцність на зріз

**Вступ.** Титановий сплав Ti6-4 відноситься до типу  $\alpha+\beta$ , що забезпечує йому високі значення ударної в'язкості при кімнатній температурі та опору повзучості при високій температурі. Завдяки низькій питомій вазі, високій корозійній стійкості та питомій міцності сплав широко використовується в аерокосмічній, автомобілебудівній, суднобудівній галузях, атомній енергетиці, медицині тощо [1, 2]. За статистичними даними більше 50 % титану, що використовується в аерокосмічній промисловості, припадає на сплав Ti6-4, з якого виготовляють великогабаритні зварні та збірні конструкції літальних апаратів, балони високого тиску, що працюють в інтервалі температури 196...450 °C, та інші конструктивні елементи. Однак отримання сучасних виробів, зокрема складної форми та тонкостінних, потребує технології з'єднання їх окремих елементів, яка, з одного боку, буде запобігати деградації структурних і механічних характеристик сплаву, а з іншого, є надійною та низьковитратною. З'єднання сплаву Ti6-4 виконують різними методами: дуговим, електронно-променевим, лазерним, дифузійним зварюванням та високотемпературним паянням [3, 4]. Зварювання титанового сплаву Ti6-4 традиційними методами виконується при високій температурі та супроводжується структурними перетвореннями в матеріалі, зростанням зерна, формуванням крихких інтерметалідів, метастабільних фаз, дефектів та

пор, що призводить до зниження показників міцності сплаву та формування залишкових напружень у з'єднанні [5, 6]. Найбільш прийнятним для формування з'єднання сплаву є метод високотемпературного вакуумного паяння, оскільки процес відбувається у вакуумі, що запобігає окисленню сплаву та не потребує використання флюсу з подальшим очищенням поверхні з'єднання від забруднення та продуктів корозії. Відсутність значних стискаючих зусиль дозволяє з'єднувати деталі з тонкими стінками та складної форми. Зважаючи на високу температуру  $\alpha\leftrightarrow\beta$  перетворення в сплаві Ti6-4 (970...1010 °C [7]), паяння проводять з використанням високотемпературних припоїв, найпоширенішими з яких є припої на основі систем Ti–Cu–Ni та Ti–Zr–Cu–Ni, при температурі 980...1040 °C, близькій до температури фазового перетворення. Ці припої є найбільш прийнятними для отримання з'єднань, що використовуються при температурі ~ 600 °C та агресивному середовищі і мають міцність на зріз ~ 50...70 % від основного матеріалу [8]. Використання високотемпературних припоїв при певних технологічних параметрах забезпечує високі показники міцності з'єднання [9], а для формування дуплексної структури та відновлення механічних властивостей титанового сплаву проводять додаткову термообробку [10]. Однак паяння тонкостінних та виготовлених з деформаційнозмцнених сплавів елементів конструкцій

бажано проводити при більш низькій температурі через можливу деградацію структури титанового сплаву. Зниження температури паяння необхідно також при виготовленні конструкцій, які складаються з елементів різного хімічного складу. Тому розробка нових методів з'єднання сплаву Тi6-4, що забезпечать зниження рівня термічного впливу на сплав, є актуальним. Відомо, що використання проміжних багатошарових прошарків, в яких при нагріванні дифузійні процеси перемішування компонентів проходять з аномально високою швидкістю, дозволяє знизити температуру процесу формування з'єднання [11]. З цієї точки зору, з'єднання титанового сплаву Тi6-4 доцільно проводити з використанням багатошарових прошарків на основі систем з евтектикою, яка має температуру плавлення < 980 °С, що буде запобігати деградації структурних характеристик сплаву. Перевагою такого підходу є швидке формування тонкого прошарку рідкої фази в стику за рахунок інтенсивного дифузійного перемішування компонентів багатошарового прошарку, що забезпечить змочування поверхонь з'єднання та їх фізичний контакт при низькому зусиллі стискання. У роботі проведено дослідження закономірностей формування структури та механічних властивостей з'єднань сплаву Тi6-4, отриманих дифузійним з'єднанням через проміжні багатошарові прошарки на основі сис-

тем з евтектикою Тi–Cu та Тi–Cu–Ni в області температури 920...950 °С.

**Матеріали та методи.** Проміжні прошарки у вигляді багатошарової фольги (БФ) хімічного складу, близького до складу подвійних евтектик І та ІІ системи Тi–Cu (рис. 1, а) та потрібної евтектики ІІІ системи Тi–Cu–Ni (рис. 1, б), було отримано методом пошарового електронно-променевого осадження компонентів на підкладку, що обертається, докладно описаним у [14]. Схему отримання БФ показано на рис. 1, в.

Співвідношення товщин шарів компонентів двокомпонентної БФ визначається співвідношенням інтенсивностей їх парових потоків. Період чергування шарів (сума товщин шарів двох компонентів) при певній інтенсивності випаровування визначається швидкістю обертання підкладки. Тиск у камері при осадженні підтримується на рівні  $10^{-3}$  Па. Температуру підкладки підтримували нижчою за 300 °С, що запобігало дифузійному перемішуванню компонентів шарів. При швидкості обертання підкладки 2 хв<sup>-1</sup> отримано БФ з періодом чергування шарів 500 нм та завтовшки 35 мкм. Необхідний хімічний склад трикомпонентної БФ Тi–Cu–Ni забезпечували плакуванням прошарку Тi–Cu шарами нікелю певної товщини шляхом випаровування додаткового зливка нікелю. На рис. 2, а показана

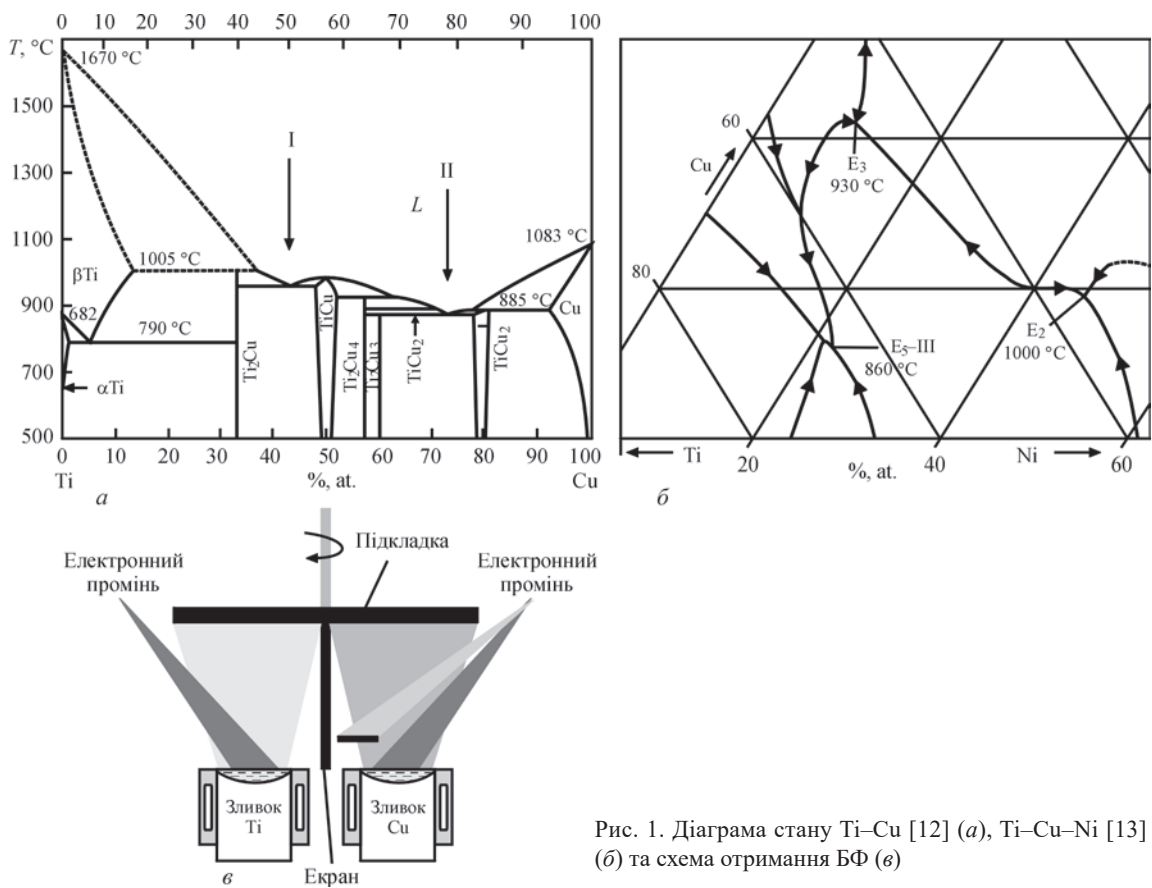


Рис. 1. Діаграма стану Тi–Cu [12] (а), Тi–Cu–Ni [13] (б) та схема отримання БФ (в)

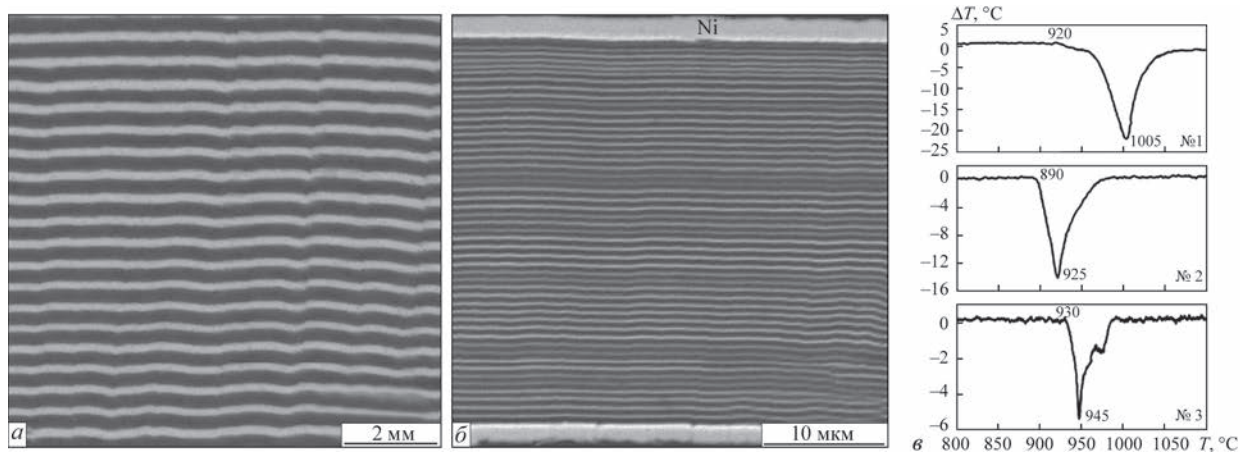


Рис. 2. СЕМ зображення поперечного перерізу БФ Ti/Cu № 1 з періодом шарів 500 нм (а), БФ Ti–Cu–Ni № 3 (б), фрагменти кривих ДТА БФ (в)

но мікроструктуру двокомпонентної БФ Ti/Cu, а на рис. 2, б – загальний вигляд трикомпонентної фольги Ti–Cu–Ni. У табл. 1 наведено хімічний склад двокомпонентної та трикомпонентної БФ. Визначення температури плавлення фольги проводили методом диференційного термічного аналізу (ДТА) на установці ВДТА-2000. На рис. 2, в показано фрагменти кривих ДТА в області плавлення фольг різного складу, а в табл. 1 наведено інтервали їх плавлення.

З’єднання сплаву Ti6-4 проводили шляхом нагрівання збірки, що складалася зі зразків сплаву та розміщеної між ними БФ, у вакуумній камері в оснащенні, яке дозволяло фіксувати положення зразків та фольги (рис. 3, а). Розміри зразків показано на рис. 3, б.

Перед процесом з’єднання проводили шліфування поверхонь зразків на абразивному папері Р1200 та ультразвукове очищення зразків і фольги

в ацетоні. Процес з’єднання проводили при температурі 920 та 950 °С, 60 хв та 980 °С, 30 хв при зусиллі стискання 70 кПа. Температуру процесу обирали відповідно до температури плавлення БФ. Вакуум у камері підтримували на рівні 10<sup>-3</sup> Па.

Мікроструктуру та хімічний склад різних ділянок з’єднань досліджували з використанням скануючого електронного мікроскопа CamScan-4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу EDX INCA 200. Зразки для металографічних досліджень готували за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального обладнання фірми Struers. Для оцінки якості з’єднань було проведено випробування зразків на зріз з використанням спеціального оснащення (рис. 3, в). Міцність на розтяг зразків стандартної форми за ГОСТом визначали на розривній машині ZDM 4. Середнє значення міцності визначали за результатами випробувань не менше трьох зразків.

Таблиця 1. Характеристики БФ

| Номер БФ | Структура БФ | Загальний хімічний склад БФ, ат. % |      |      | Інтервал плавлення, °С |
|----------|--------------|------------------------------------|------|------|------------------------|
|          |              | Ti                                 | Cu   | Ni   |                        |
| 1        | Ti/Cu        | 55,7                               | 44,3 |      | 920...1005             |
| 2        | Ti/Cu        | 22,6                               | 77,4 |      | 890...925              |
| 3        | Ni+Ti/Cu+Ni  | 67,1                               | 18,1 | 14,8 | 930...945              |

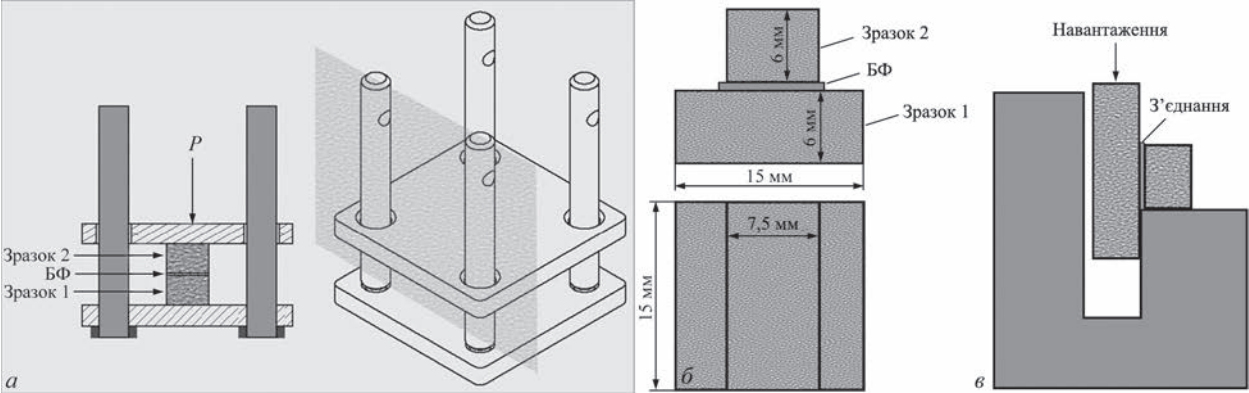


Рис. 3. Схематичне зображення оснащення для проведення процесу з’єднання (а), зразків (б) та оснащення для випробувань на зріз (в)

Таблиця 2. Властивості з’єднань, отриманих при різних режимах

| Номер БФ | Температура, °С | Тривалість, хв | Ширина дифузійної зони, мкм | Міцність на зріз $\tau$ , МПа |
|----------|-----------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1        | 920             | 60             | 120                         | 180                           |
|          | 950             | 60             | 150                         | 190                           |
| 2        | 920             | 60             | 123                         | 160                           |
|          | 950             | 60             | 190                         | 409                           |
| 3        | 920             | 60             | 190                         | 453                           |
|          | 950             | 60             | 250                         | 532                           |

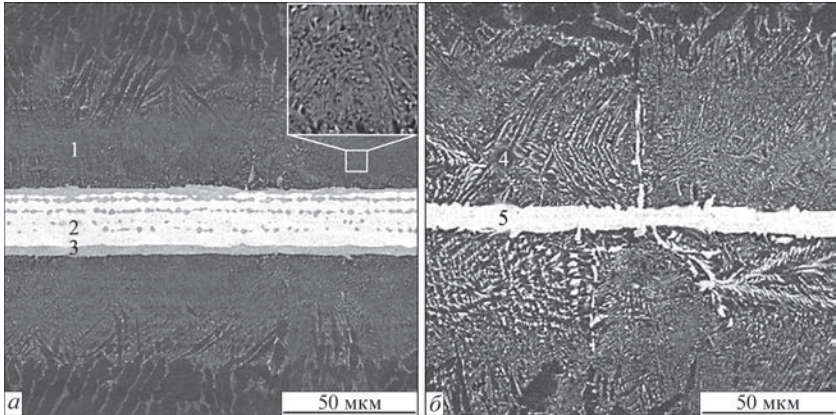


Рис. 4. Мікроструктура з’єднань, отриманих з використанням проміжної БФ № 1 на режимах: 920 °С, 60 хв (а) та 950 °С, 60 хв (б)

**Експериментальні результати та їх обговорення.** У табл. 2 наведено характеристики з’єднань, отриманих з використанням БФ при різних режимах.

На рис. 4–6 показано мікроструктуру з’єднань. Хімічний та фазовий склад відповідних ділянок дифузійної зони наведено в табл. 3–5. При з’єднанні через БФ № 1 та № 2 у дифузійній зоні формуються області різного хімічного та фазового складу (рис. 4, 5), що є наслідком дифузійного перемішування компонентів БФ і титанового сплаву завдяки змочуванню поверхні сплаву рідкою фазою, яка утворюється при плавленні БФ.

У центральній частині дифузійної зони формується шар на основі інтерметалідів  $Ti_2Cu$  та

Таблиця 3. Хімічний та фазовий склад ділянок з’єднань на рис. 4

| Ділянка | Хімічний склад, ат. % |       |      |       | Фазовий склад          | HV20, ГПа |
|---------|-----------------------|-------|------|-------|------------------------|-----------|
|         | Al                    | Ti    | V    | Cu    |                        |           |
| 1       | 7,81                  | 80,6  | 3,1  | 8,49  | $\alpha$ -Ti+ $Ti_2Cu$ | 3,7       |
| 2       |                       | 53,96 |      | 46,04 | TiCu+ $Ti_2Cu$         | 3,4       |
| 3       | 1,95                  | 66,4  |      | 31,65 | $Ti_2Cu$               |           |
| 4       | 7,31                  | 80,11 | 2,54 | 10,04 | $\alpha$ -Ti+ $Ti_2Cu$ | 3,8       |
| 5       | 2,37                  | 67,69 |      | 29,94 | $Ti_2Cu$               | 3,0       |

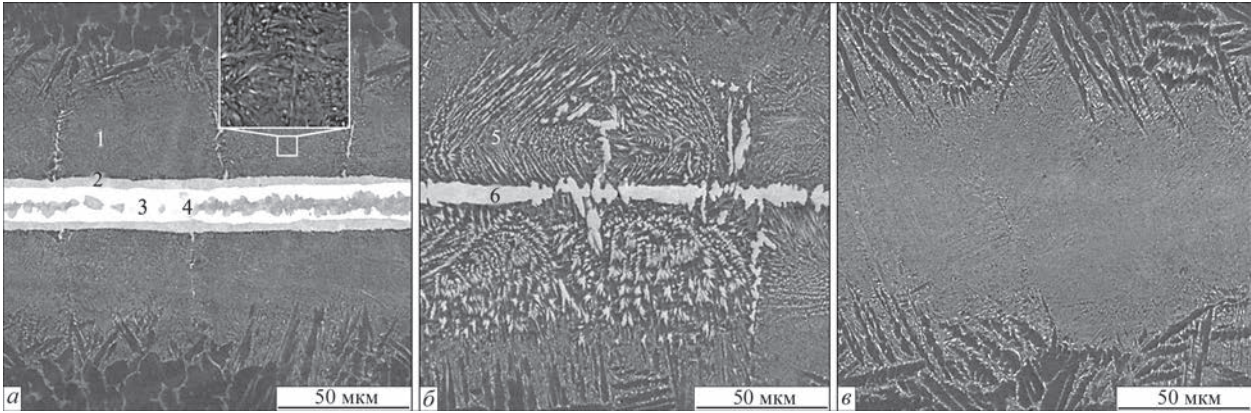


Рис. 5. Мікроструктура з’єднань, отриманих з використанням проміжної БФ № 2 на режимах: 920 °С, 60 хв (а), 950 °С, 60 хв (б), 980 °С, 30 хв (в)

Таблиця 4. Хімічний та фазовий склад ділянок з'єднань на рис. 5

| Ділянка | Хімічний склад, ат. % |       |      |       | Фазовий склад                   | HV20, ГПа |
|---------|-----------------------|-------|------|-------|---------------------------------|-----------|
|         | Al                    | Ti    | V    | Cu    |                                 |           |
| 1       | 8,95                  | 77,29 | 4,21 | 9,55  | $\alpha$ -Ti+Ti <sub>2</sub> Cu | 3,7       |
| 2       | 2,43                  | 65,66 |      | 31,91 | Ti <sub>2</sub> Cu              |           |
| 3       |                       | 50,43 |      | 49,57 | TiCu                            | 3,2       |
| 4       | 7,6                   | 59,09 |      | 33,31 | Ti <sub>2</sub> Cu              | 3,0       |
| 5       | 8,64                  | 77,53 | 3,57 | 10,27 | $\alpha$ -Ti+Ti <sub>2</sub> Cu | 3,9       |
| 6       | 2,7                   | 66,81 |      | 30,49 | Ti <sub>2</sub> Cu              | 3,2       |

TiCu внаслідок реакційної взаємодії компонентів БФ при нагріванні та зустрічній дифузії міді та титану на інтерфейсі БФ/сплав. Товщина та фазовий склад інтерметалідного шару визначаються хімічним складом БФ і температурою нагрівання. При збільшенні температури товщина інтерметалідного шару зменшується та відбувається його фрагментація. Одночасне його збагачення титаном призводить до формування інтерметаліду Ti<sub>2</sub>Cu. Слід зазначити, що інтенсивність дифузійного перемішування титану та міді при використанні БФ № 2 вища. Це можна пояснити збільшенням об'ємної долі рідкої фази в стикі при температурі нагрівання 920...950 °С, що забезпечується меншим інтервалом плавлення БФ № 2 (табл. 1).

Формування інтерметалідного шару в стикі можна пояснити таким чином. При нагріванні БФ Ti/Cu до температури плавлення поява рідкої фази в стикі сприяє дифузії титану зі сплаву в проміжний прошарок, що призводить до формування надлишкових інтерметалідів TiCu та Ti<sub>2</sub>Cu, температура плавлення яких вище температури процесу з'єднання. Можна припустити, що це призводить

до зменшення об'ємної долі рідкої фази в стикі та обмежує дифузійне перемішування компонентів. На користь цього припущення вказує відсутність інтерметалідного шару в з'єднанні, яке отримано при температурі 980 °С (рис. 5, в), що перевищує температуру плавлення інтерметалідів TiCu та Ti<sub>2</sub>Cu. Дифузія міді в титановий сплав призводить до зниження температури перетворення  $\alpha \leftrightarrow \beta$ , у результаті цього в процесі охолодження в дифузійній зоні відбувається розпад  $\beta$ Ti за евтектоїдною реакцією  $\beta$ Ti  $\rightarrow$   $\alpha$ Ti + Ti<sub>2</sub>Cu з формуванням евтектоїду заевтектоїдного складу з дисперсною структурою (ділянка 1 та її збільшений вигляд на рис. 4, а та 5, а), фазові складові якого укрупнюються при збільшенні температури (ділянки 4 на рис. 4, б та 5 на рис. 5, б). Між ділянкою з евтектоїдною структурою та Ti6-4 формується область з Відманштеттеновою структурою внаслідок перетворення  $\beta$ Ti в голчастий  $\alpha$ Ti.

При з'єднанні сплаву Ti6-4 через БФ № 3 при температурі 920 та 950 °С не спостерігається формування в стикі шару інтерметалідів (рис. 6).

Можна припустити, що при плавленні фольги формується значний об'єм рідкої фази однорідно-

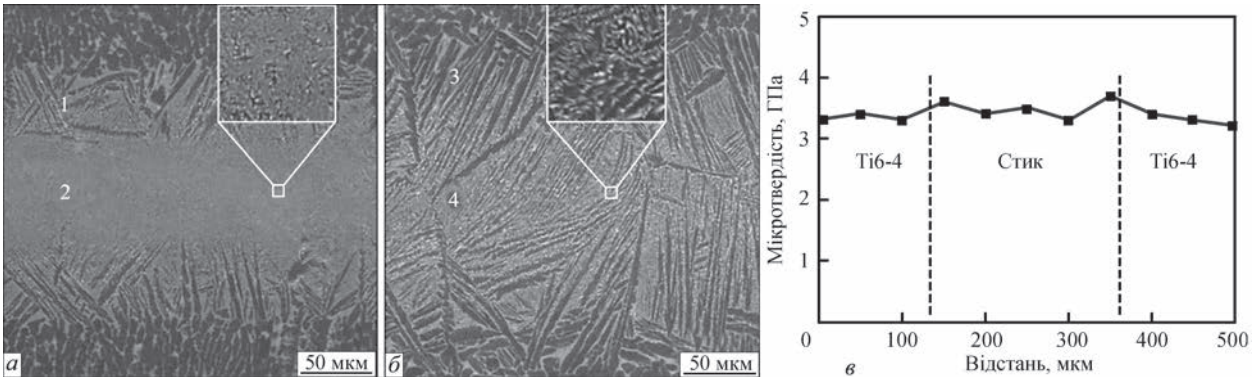


Рис. 6. Мікроструктура з'єднань, отриманих з використанням проміжної БФ № 3 на режимах: 920 °С, 60 хв (а) та 950 °С, 60 хв (б) та розподіл мікротвердості в стикі (в)

Таблиця 5. Хімічний та фазовий склад ділянок з'єднань на рис. 6

| Ділянка | Хімічний склад, ат. % |       |      |      |      | Фазовий склад                                      |
|---------|-----------------------|-------|------|------|------|----------------------------------------------------|
|         | Al                    | Ti    | V    | Ni   | Cu   |                                                    |
| 1       | 7,86                  | 82,03 | 3,51 | 3,35 | 3,25 | $\alpha$ -Ti+Ti <sub>2</sub> Cu+Ti <sub>2</sub> Ni |
| 2       | 5,99                  | 81,52 | 2,52 | 4,03 | 5,94 |                                                    |
| 3       | 9,44                  | 83,87 | 3,64 | 1,47 | 1,59 |                                                    |
| 4       | 8,07                  | 82,46 | 2,5  | 2,61 | 4,35 |                                                    |

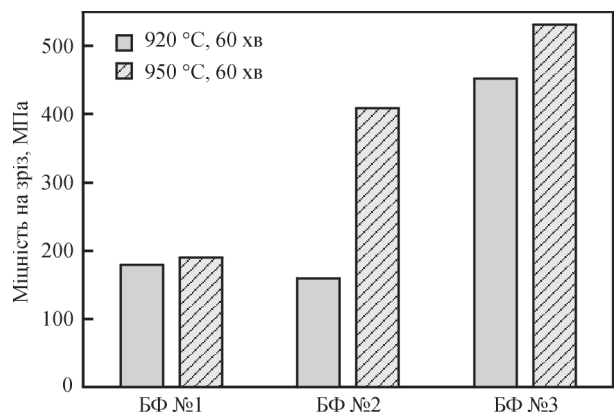


Рис. 7. Міцність на зріз з'єднань

го складу, про що свідчить вузький інтервал плавлення фольги (табл. 1). Це забезпечує інтенсивне дифузійне перемішування компонентів фольги та сплаву і формування суцільного прошарку  $\beta\text{Ti}$  в стику внаслідок зниження температури перетворення  $\alpha \rightarrow \beta$ . При охолодженні в з'єднанні формуються дві структурні ділянки. У центральній частині з'єднання (ділянки 2, 4 на рис. 6, а, б) формується евтектотид з дисперсною структурою за евтектотидною реакцією  $\beta\text{Ti} \rightarrow \alpha\text{Ti} + \text{Ti}_2(\text{Cu}) + \text{Ti}_2(\text{Ni})$ . Між евтектотидною ділянкою та металом сплаву наявна область з Відманштеттеновою структурою. При збільшенні температури процесу відбувається укрупнення структурних складових ділянок (рис. 6, б). З іншого боку, підвищення температури забезпечує збільшення інтенсивності дифузійного перемішування компонентів БФ та сплаву і ширини дифузійної зони та формування Відманштеттенової структури по всій її ширині, що сприяє однорідності хімічного складу та мікротвердості стику (рис. 6, б, в).

Для оцінки механічних властивостей з'єднань проведено їх випробування на зріз. На рис. 7 наведено порівняльну діаграму міцності на зріз з'єднань, отриманих при використанні різної БФ.

Видно, що формування в стику суцільного інтерметалідного шару обумовлює низьку міцність з'єднання. Останнє руйнується в області інтерметалідного шару (рис. 8, а, б), який має мікротвердість, нижчу за сусідні ділянки (табл. 3, 4). Можна припустити, що формування інтерметалідів  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  та  $\text{TiCu}$  внаслідок реакційної дифузії титану та міді при нагріванні супроводжується формуванням дефектів вакансійного типу та пор за рахунок об'ємного ефекту при фазових перетвореннях. Слід зазначити, що формування в стику фрагментованого інтерметалідного прошарку (рис. 5, б) сприяє зростанню міцності на зріз з'єднання. Відсутність в стику шару інтерметалідів та формування однорідної структури дифузійної зони забезпечує підвищення механічних властивостей з'єднання. Так, найвищою міцністю на зріз (532 МПа) та розтяг (930 МПа) характеризується з'єднання, отримане з використанням БФ № 3 при температурі 950 °C, в якому вміст інтерметалідоутворюючих компонентів ( $\text{Ni} + \text{Cu}$ ) в стику < 7 ат. %. Міцність з'єднання відповідає рівню міцності сплаву  $\text{Ti6-4}$  ( $\sigma = 935$  МПа при випробуванні на розтяг), що забезпечується однорідністю механічних властивостей ділянок з'єднання (рис. 6, в).

При випробуваннях на зріз і розтяг з'єднання руйнується в області сплаву  $\text{Ti6-4}$  (рис. 8, в, г). Отриманий нами результат узгоджується з експериментальними даними авторів [15], одержаними при високотемпературному паянні сплаву  $\text{Ti6-4}$  з використанням традиційних припоїв  $\text{Ti-Zr-Ni-Cu}$  при температурі 950...990 °C. Перевагою методу дифузійного з'єднання з використанням проміжного прошарку БФ евтектичного складу є можливість зниження температури, необхідної для отримання рівномірного та бездефектного з'єднання титанового сплаву.

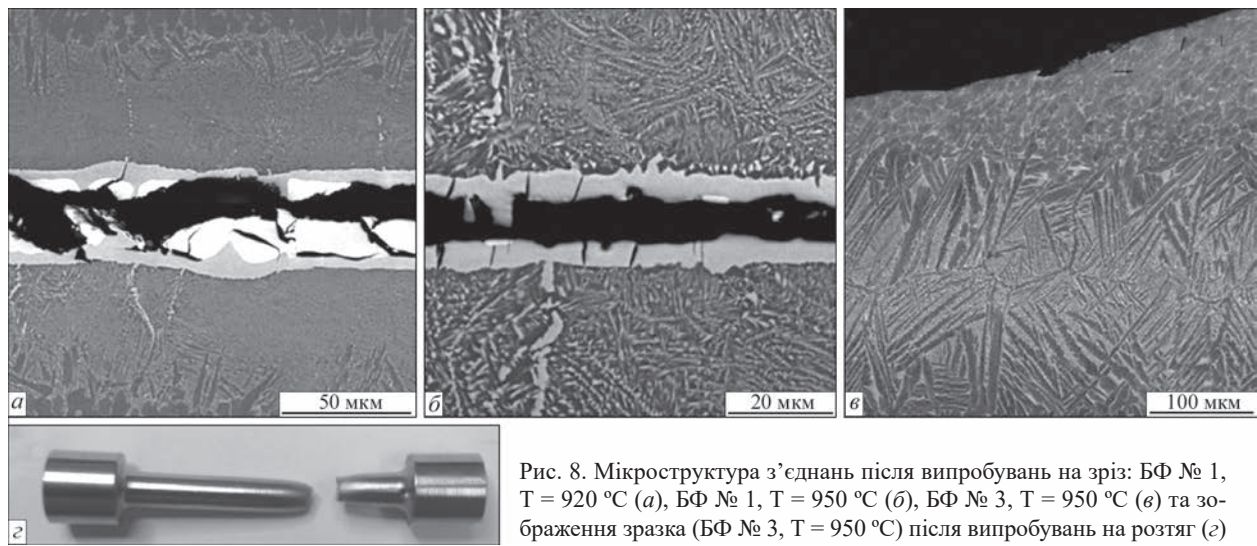


Рис. 8. Мікроструктура з'єднань після випробувань на зріз: БФ № 1,  $T = 920$  °C (а), БФ № 1,  $T = 950$  °C (б), БФ № 3,  $T = 950$  °C (в) та зображення зразка (БФ № 3,  $T = 950$  °C) після випробувань на розтяг (г)

## Висновки

1. Використання проміжних багатошарових прошарків евтектичного складу на основі систем Ti–Cu та Ti–Cu–Ni забезпечує отримання нероз’ємного та бездефектного з’єднання сплаву Ti6-4 методом дифузійного з’єднання при температурі 920...950 °C.

2. Мікроструктура з’єднання залежить від температури та інтервалу плавлення БФ і визначається реакційною взаємодією компонентів фольги та титанового сплаву при нагріванні. Формування в стику шару інтерметалідів  $Ti_2Cu$  та  $TiCu$  призводить до зниження механічних властивостей з’єднання.

3. Отримання з’єднання з міцністю на зріз та розтяг, яка відповідає міцності сплаву Ti6-4, забезпечується формуванням в стику дисперсної Відманштеттенової структури з вмістом міді та нікелю < 7 ат. % та однорідним розподілом мікротвердості.

## Список літератури/Referenses

- Leyens, C., Peters, M. (2003) *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. WILEY-VCH, Weinheim.
- Lutjering, G., Williams, J.C. (2007) *Titanium*. 2 ed. Springer-Verlag, Berlin.
- Balasubramanian, T., Balasubramanian, V., Muthumanikkam, M. (2011) Fatigue performance of gas tungsten arc, electron beam, and laser beam welded Ti–6Al–4V alloy joints. *J. Mater. Eng. and Performance*, **20**, 1620–1630. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9822-y>.
- Ahmed, Y.M., Salleh, K., Sahari, M., Ishak, M. (2012) *Welding of titanium (Ti–6Al–4V) alloys: A review*. In: *Proc. of the National Graduate Conf.*, Kajang, Malaysia, 8–10.
- Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P., Petrichenko, I.K. et al. (2001) Effect of the method of fusion welding on properties of welded joints in alloy Ti–6Al–4V. *The Paton Welding J.*, **4**, 2–6.
- Murthy, K.K., Potluri, N.B., Sundaresan, S. (1997) Fusion zone microstructure and fatigue crack growth behaviour in Ti–6Al–4V alloy weldments. *Mater. Sci. and Technol.*, **13**(6), 503–510. DOI: <https://doi.org/10.1179/mst.1997.13.6.503>
- Borisova, E.A. (1980) *Titanium alloys. Metallography of titanium alloys*. Metallurgiya, Moscow [in Russian].
- Shapiro, A., Rabinkin, A. (2003) State of the art of titanium-based brazing filler metals. *Welding J.*, **82**(10), 36–43.
- Elrefaey, A., Tillmann, W. (2009) Effect of brazing parameters on microstructure and mechanical properties of titanium joints. *J. of Materials Proc. Technology*, **209**, 4842–4849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.006>
- Shapiro, A.E. (2016) Brazing of conventional titanium alloys. *ASM Metal Handbook*, **6**, 1–25.
- Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Ishchenko, A.Ya et al. (2008) Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **16**, 1043–1045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2008.05.002>
- Murray, J.L. (1983) The Cu–Ti (copper-titanium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, **4**(1), 81–95.
- Cacciamani, G., Schuster, J.C., Effenberg, G., Ilyenko, S. (2006) Cu–Ni–Ti (copper–nickel–titanium). *Light metal ternary systems: Phase diagrams, crystallographic and thermodynamic data*, **11**, 266–283.
- Ustinov, A.I., Melnychenko, T.V., Demchenkov, S.A. (2021) Structural mechanism of plastic deformation of Al/a-Si multilayer foils at heating under load. *Materials Science and Engineering: A*, **810**, 141030. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141030>
- Ganjeh, E., Sarkhosh, H., Bajgholi, M.E. et al. (2012) Increasing Ti–6Al–4V brazed joint strength equal to the base metal by Ti and Zr amorphous filler alloys. *Mater. Charact.*, **71**, 31–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.016>

## DIFFUSION BONDING OF Ti6-4 ALLOY THROUGH MULTILAYER INTERLAYERS OF AN EUTECTIC COMPOSITION BASED ON Ti–Cu SYSTEM

T.V. Melnychenko, A.I. Ustinov, O.Yu. Klepko, O.V. Samofalov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: [melnychenko21@ukr.net](mailto:melnychenko21@ukr.net)

The regularities of diffusion bonding of the titanium alloy Ti6-4 through multilayer interlayers of eutectic composition based on Ti–Cu system, produced by electron beam deposition in vacuum, were investigated in this work. The microstructure and mechanical properties of the joints were analyzed using scanning electron microscopy and by determining their shear strength. It is shown that multilayer interlayers provide defect-free joints without degradation of titanium alloy properties at a temperature of 920...950 °C, corresponding to the melting interval of the interlayer. It is established that the nature of the reaction interaction of the components of the interlayer and Ti6-4 alloy during heating depends on the temperature and melting interval of the multilayer interlayer and determines the microstructure and phase composition of the joint. Absence of continuous layers of intermetallics ( $TiCu$ ,  $Ti_2Cu$ ) in the joint and formation of a dispersed Widmanstätten structure with copper and nickel content of < 7 at.% provide the joint strength at the level of the Ti6-4 alloy. 15 Ref., 5 Tabl., 8 Fig.

**Keywords:** multilayer foil, EB-PVD, Ti6-4 alloy, diffusion bonding, microstructure, shear strength

Отримано 31.07.2024

Отримано у переглянутому вигляді 23.10.2024

Прийнято 26.11.2024

**НОВА СЕРІЯ  
ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІНВЕРТОРІВ**



PATON.UA

