

порожнини катода назовні в результаті викривлення траєкторії їх руху під дією двох взаємно перпендикулярних електричних полів – у темному катодному просторі в проміжку катод – деталь і в проміжку катод – анод.

3. Розрахунковим шляхом визначено, що якщо для  $I_{к-д} = 0,006$  м максимальна величина зсуву траєкторії електронів у бік анода не перевищує  $0,02...0,04$  м, то для  $I_{к-д} = 0,021$  м величина такого зсуву зростає майже на порядок. Це обумовлює необхідність зниження площі можливих каналів відходу електронів з катодної порожнини, в першу чергу, скороченням відстані між емітуючою поверхнею катода і деталлю.

### Список використаних джерел

1. Болотов Г. П. Поверхневий нагрів тліючим розрядом при дифузійному зварюванні / Г. П. Болотов // Вісник ЧДТУ. – 2004. – № 21. – С. 111-119.
2. Болотов Г. П. Тлеющий разряд как источник нагрева в процессах сварки и пайки (обзор) / Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 2001. – № 8. – С.41-44.
3. Елецкий А. В. Газовый разряд / А. В. Елецкий – М.: Знание, 1981. – 64 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
5. Пехович А. И. Расчет теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких – Л.: Энергия, 1968. – 303 с.

УДК 621.791.4

**Г.К. Харченко**, д-р техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**Ю.В. Фальченко**, канд. техн. наук

**Л.В. Петрушинець**, інженер

Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

## ДИFUZІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО СПЛАВУ $\gamma$ -TiAl ІЗ СПЛАВОМ ТИТАНУ ВТ8

*Розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl із сплавом титану ВТ8. Показано, що використання формуючих матриць сприяє обмеженню пластичної деформації титану й отриманню бездефектних з'єднань.*

### Постановка проблеми

З розвитком аерокосмічних технологій і появою нових конструкційних жароміцних сплавів виникає необхідність у їхньому зварюванні як в однорідному сполученні, так і різнорідному. До таких пар можна віднести інтерметалідний сплав  $\gamma$ -TiAl, який має структуру  $\gamma + \alpha_2$ , і двофазний сплав титану ВТ8 із структурою  $\alpha + \beta$ .

Відомо, що оптимальними параметрами для дифузійного зварювання сплавів титану є температура  $T_{зв} = 800 \dots 1050$  °С, тиск  $P_{зв} = 1 \dots 10$  МПа, час  $t_{зв}$  до 30 хв [1].

При зварюванні  $\gamma$ -TiAl оптимальним режимом слід вважати температуру  $T_{зв} = 1200$  °С, тиск  $P_{зв} = 15 \dots 40$  МПа, час  $t_{зв} = 20 \dots 60$  хв [2; 3].

Однак параметри, які визначено як оптимальні при зварюванні сплавів титану, для зварювання інтерметалідних сплавів зі сплавами титану не прийнятні в наслідок значної пластичної деформації титану.

### Формування цілей статті

Метою наших досліджень було розробити технологію одержання зварного з'єднання  $\gamma$ -TiAl зі сплавом титану ВТ8.

### Методика експерименту

Зварювання інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl (59,2Ti – 33,3Al – 4,8Nb – 2,7Cr мас. %) із сплавом титану ВТ8 (88,4Ti – 3,9Al – 7,6Mo – 0,1Si мас. %) проводили у вакуумі  $V_{зв} =$

$1,33 \cdot 10^{-3}$  Па при температурі  $T_{зв} = 1200$  °С, тиску  $P_{зв} = 20$  МПа, часі  $t_{зв} = 20$  хв, швидкість нагрівання складала  $V = 150$  °С/хв. Підготовка зразків під зварювання складалася з розрізання їх на електроерозійному верстаті, шліфування поверхонь, які підлягали зварюванню, і знежирення. Шліфи зварних з'єднань для дослідження мікроструктури виготовляли за стандартною методикою з використанням алмазних паст. Виявлення мікроструктури проводили в суміші плавикової та азотної кислот з додаванням гліцерину. Мікроструктуру досліджували методом оптичної металографії на мікроскопі «Neophot-32». Хімічний склад зони з'єднання та ділянок металу, що прилягали до неї, визначали мікрорентгеноспектральним аналізом за допомогою растрового електронного мікроскопу JSM-840 фірми «JEOL». Мікротвердість структурних складових вимірювали на твердомірі фірми «LECO» навантаженням 50 г.

### Виклад основного матеріалу досліджень

Як показали попередні наші дослідження, при зварюванні на режимах, оптимальних для зварювання інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl, відбувається значна пластична деформація сплаву титану VT8. Ступінь пластичної деформації зразків із сплаву VT8 при 1200 °С складає  $\sim 40$  %.

Аналіз мікроструктури з'єднань, отриманих при значеннях тиску, прийнятих для зварювання сплавів титану ( $P_{зв} = 5$  МПа), показує, що в зоні з'єднання спостерігається значна кількість дефектів. Відомо, що при одержанні біметалічних з'єднань м'яких матеріалів із твердими, котрі значно відрізняються за своїми механічними властивостями, добре зарекомендувала себе схема зварювання у формуючих обоймах [4; 5]. При цій схемі зварювання в зоні з'єднання практично відсутня пористість, що автори пояснюють "текучістю" більш м'якого з металів – міді [5] або титану [4] по поверхні твердого, що в кінцевому підсумку і призводить до забезпечення фізичного контакту.

Для проведення експериментів нами було спроектовано пристрій. На відміну від існуючих конструкцій формуючих пристроїв, які застосовують при зварюванні у твердій фазі [4; 5], у нашій конструкції обмежували пластичну деформацію тільки більш м'якого з матеріалів – сплаву титану VT8.

Схему пристрою для зварювання інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl із сплавом VT8 представлено на рис. 1. Зразок із сплаву VT8 – 1 фіксували в розбірній втулці – 2, яку вставляли в обойму – 3. Знизу обойми – 3 знаходиться вкладиш – 4. За рахунок зміни висоти вкладиша – 4 задавали величину пластичної деформації сплаву VT8. Зверху VT8 встановлювали інтерметалідний сплав  $\gamma$ -TiAl – 5.

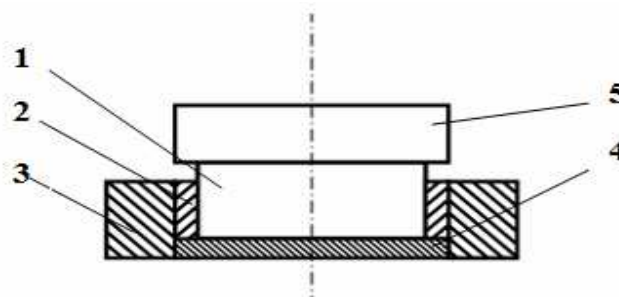


Рис. 1. Схема пристрою для зварювання інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl зі сплавом VT8:  
1 – зразок із сплаву VT8; 2 – розбірна втулка; 3 – обойма; 4 – вкладиш; 5 – зразок з інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl

Металографічними дослідженнями зварних з'єднань встановлено, що після електрохімічного травлення зона з'єднання являє собою чітко виражену смугу товщиною 10-15 мкм (рис. 2, а). При вивченні зварного з'єднання за допомогою растрової електронної мікроскопії на не травленому шліфі в зоні з'єднання дефекти зварювання не виявлені (рис. 2, б).

Концентрація елементів (мас. %) у зоні з'єднання за даними мікрорентгеноспектрального аналізу складає (рис. 3, т. 1) 66,54Ti – 25,40Al – 6,22Nb – 1,15Cr – 0,69Mo (мас. %).

Можна стверджувати, що структура зони з'єднання між інтерметалідом  $\gamma$ -TiAl і сплавом ВТ8 являє собою дуплексну структуру ( $\gamma + \alpha_2$ ). На ділянці, що прилягає до зони з'єднання з боку інтерметаліду  $\gamma$ -TiAl (рис. 3, т. 2), концентрація елементів становить: 64,69Ti – 24,27Al – 5,97Nb – 4,28Cr – 0,79Mo (мас. %).

Структура інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl, що прилягає до зони з'єднання (рис. 3, т. 3 і 4), має ламелярну структуру ( $\gamma + \alpha_2$ ). У структурі інтерметалідного сплаву спостерігаються пластини світло-сірого кольору, окантовані округлими виділеннями, що містять ніобій. Фаза, що містить ніобій (т. 4), являє собою хімічну сполуку  $Ti_2AlNb$ .

Вміст елементів у т. 3 та 4 відповідно дорівнює:

- 62,86Ti – 25,11Al – 7,19Nb – 1,90Mo – 2,94Cr (мас. %);
- 61,58Ti – 29,31Al – 5,48Nb – 0,67Mo – 2,96Cr (мас. %).

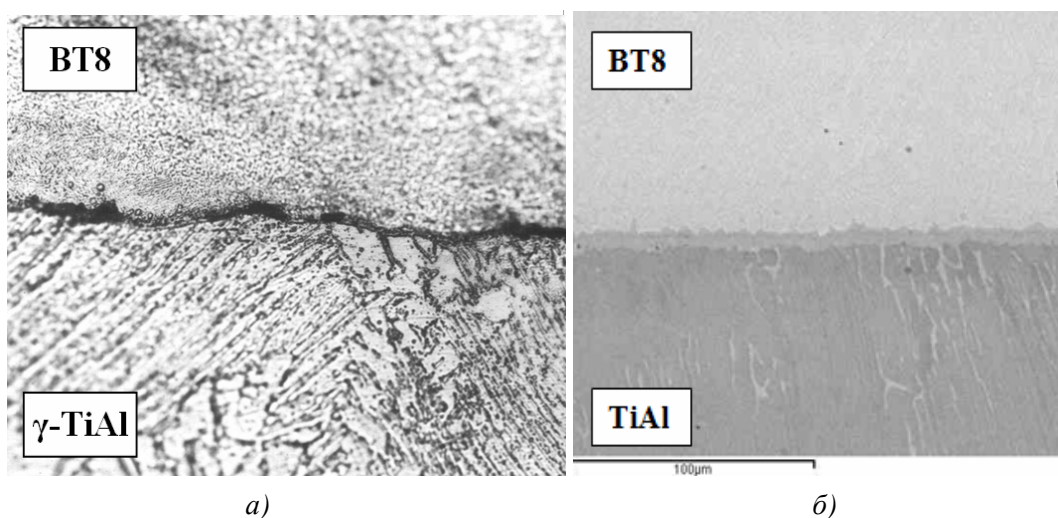


Рис. 2. Вигляд зони з'єднання  $\gamma$ -TiAl – ВТ8: а – оптична мікроскопія,  $\times 400$ ; б – растрова електронна мікроскопія,  $\times 1000$

З боку сплаву ВТ8 до зони з'єднання прилягає безструктурна смуга товщиною 60...80 мкм (рис. 2, а). Ділянки, які досліджували (рис. 3, т. 5 і 6), розташовані в сплаві ВТ8 на відстані 30 і 120 мкм від зони з'єднання.

Вміст елементів у т. 5 та 6 відповідно дорівнює:

- 89,78Ti – 3,74Al – 0,84Nb – 4,25Mo – 1,39Cr (мас. %);
- 89,71Ti – 3,65Al – 0,62Nb – 6,02Mo (мас. %).

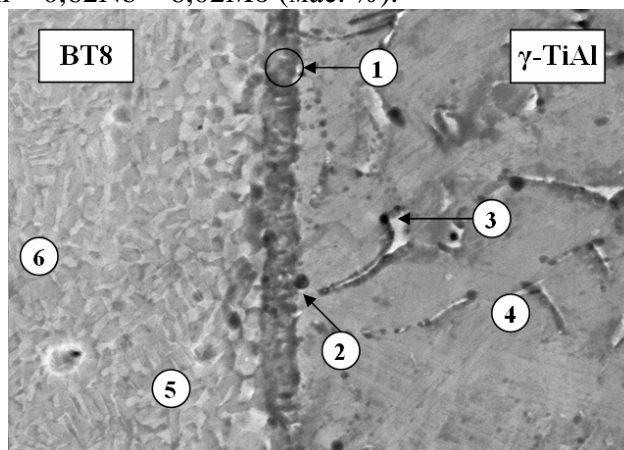


Рис.3. Мікроструктура зони з'єднання  $\gamma$ -TiAl – ВТ8 (растрова електронна мікроскопія),  $\times 2000$

Характер розподілу елементів поблизу зони з'єднання вказує на дифузію атомів Al і Nb з алюмініду титану в сплав титану та атомів Ti в протилежному напрямку (рис. 4). Дифузійні процеси призводять до збагачення титаном та алюмінієм ділянки, що знаходиться між  $\gamma$ -TiAl і сплавом титану BT8. Можна припустити, що зміна концентрації легуючих елементів поблизу від зони з'єднання визначає його структуру і механічні властивості.

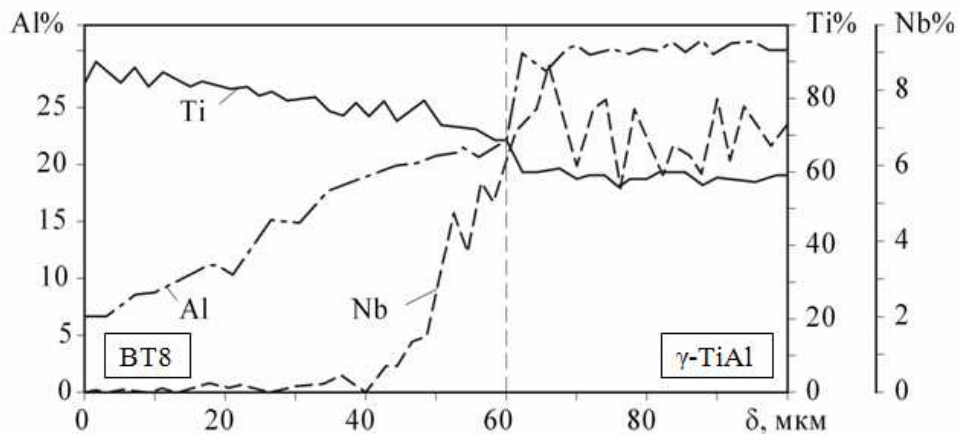


Рис. 4. Характер розподілу Ti, Al і Nb у зоні з'єднання  $\gamma$ -TiAl – BT8

Характер розподіл мікротвердості в зоні з'єднання представлено на рис. 5. Отримані результати підтверджують дані мікрорентгеноспектрального аналізу про наявність дифузійної зони з боку сплаву BT8.

Механічні випробування зварних з'єднань на зріз показали, що руйнування проходить по зоні з'єднання з присутністю в зламі окремих ділянок інтерметалідного сплаву. Міцність з'єднань на зріз дорівнює 260 МПа, що складає 72 % від міцності інтерметаліду.

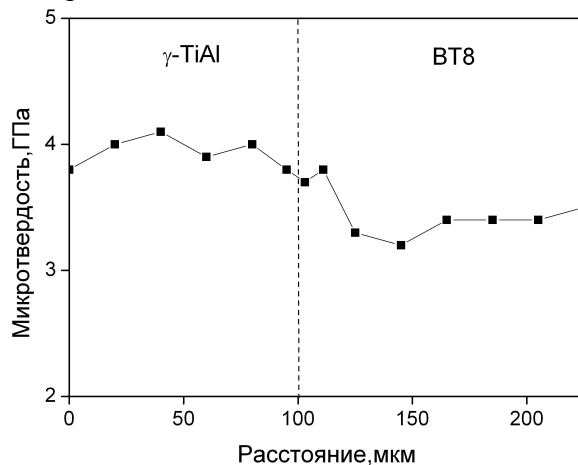


Рис. 5. Розподіл мікротвердості в зоні з'єднання  $\gamma$ -TiAl – BT8

### Висновки з дослідження

1. Розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl із сплавом титану BT8 із застосуванням формуючих пристроїв.
2. При параметрах режиму зварювання: температура  $T_{зв} = 1200$  °С, тиск  $P_{зв} = 20$  МПа,  $t_{зв} = 20$  хв отримано бездефектні зварні з'єднання.
3. Аналіз мікроструктури показує, що в процесі зварювання в зоні з'єднання формується кілька дифузійних зон з різним вмістом алюмінію, титану і ніобію.
4. Випробування зварних з'єднань на зріз показують, що руйнування проходить по зоні з'єднання з присутністю в зламі окремих ділянок інтерметалідного сплаву. Міцність з'єднань на зріз дорівнює 260 МПа, що складає 72 % від міцності інтерметаліду.

### Список використаних джерел

1. Коношков Г. В. Специальные методы сварки давлением: учебное пособие / Г. В. Коношков, Р. А. Мусин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009. – 632 с.
2. Получение неразъемных соединений сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl с использованием нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, А. Я. Ищенко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2009. – № 1. – С.17-21.
3. Diffusion Bonding of Intermetallic Compound TiAl / Yoshikuni Nakao, Kenji Shinozaki, Masahiko Namada // ISIJ International. – 1991. – Vol. 31, № 10. – P. 1260-1266.
4. Киреев Л. С. Сварка в вакууме технического титана со сталями 2Х13 и 12Х18Н10Т / Л. С. Киреев // Автоматическая сварка. – 1985. – № 3. – С. 56-58.
5. Структура соединений титана с медью, выполненных диффузионной сваркой в вакууме, при различных схемах деформирования / Л. Н. Лариков, М. Н. Белякова, В. Н. Замков, В. К. Сабочарь // Автоматическая сварка. – 1982. – № 6. – С. 21-23.

УДК 621.341.572

**Д.В. Вайц**, аспірант

**В.М. Співак**, канд. техн. наук

**Є.Ю. Коваленко**, магістрант

НТУУ «КПІ», м.Київ, Україна

### КЕРУВАННЯ ДОЗОВАНОЇ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ МЕТАЛІВ

*Викладено спосіб керування дозованою подачею електроенергії під час дугового зварювання металів з метою зменшення розбризкування крапель зварювального металу, підвищення ККД системи зварювання; описано спосіб формування для напівпровідникового перетворювача вольт-амперної характеристики, потрібної для дугового зварювального процесу; надані рекомендації з розрахунків часу затримки установалення струму дуги, необхідного згідно з технологічним процесом.*

Спосіб дугового зварювання металів з телевізійним стеженням за зростанням крапель, стікаючих з металічної проволочки або електроду [1] до стику зварювальних металів або зварювальної ванни, передбачає швидке керування зміною струму зварювання від одиниць до сотень амперів, що надходить від напівпровідникового перетворювача (джерела живлення) зварювального апарату. Під час формування електричної дуги струм перетворювача швидко зростає, частіше (типово), до 200 А. В цей час телевізійний датчик постійно стежить за зростанням краплі розплавленого металу електрода, вимірюється ширина та розраховується швидкість її зміни. Коли швидкість зміни ширини та розмір краплі досягає певного рівня, про що сигналізує телевізійний датчик й перед відривом краплі струм джерела за мілісекунди примусово зменшується, наприклад, до 50 А, завдяки чому відбувається процес плавного відриву краплі і зменшення її розбризкування. Під час контакту краплі з деталлю зменшується подача струму перетворювача, наприклад, до 10 А. Цей процес необхідний для злипання краплі розплавленого металу із зварювальною областю. Далі знову підвищується струм перетворювача до номінального значення.

Реалізація способу дозованої подачі електроенергії до зварювальної області під час дугового зварювання металів передбачає фільтрацію зображення розплавленого дугою електрода, обробку відеосигналу зображення телевізійного датчику шляхом вимірювання та реєстрації сигналу строки, що фіксує ширину відеоімпульсу, який плавно зростає і стає перед падінням краплі максимально широким. Далі відеосигнал строки перетворюється в сигнал постійної напруги. Коли амплітуда цього сигналу співпадає із наперед заданим сигналом настройки, що відповідає максимальній ширині краплі, система автоматичного керування формує імпульс, призначений для зменшення (або модуляції) подачі потужності електроенергії, тобто струму напівпровідникового перетворювача.

Функціональна схема системи керування дозованою подачею електроенергії під час дугового зварювання металів містить енергетичний напівпровідниковий перетворювач