

## РОЗДІЛ IV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.4

**Г.К. Харченко**, д-р техн. наук, професор

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

### ДИFUЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ З НЕРЖАВІЮЧОЮ СТАЛЛЮ

*Розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі алюмініду титану з нержавіючою сталлю. Для запобігання утворення в зоні з'єднання крихких інтерметалідів запропоновано застосовувати двохстадійний процес зварювання та прошарки Ti, Nb та Si у вигляді фольг суцільного перетину.*

**Постановка проблеми.** Сплави на основі алюмінідів титану є перспективними жароміцними матеріалами для виготовлення ряду деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів [1]. Практичне використання TiAl ставить питання про отримання з'єднань з іншими конструкційними матеріалами. В цій роботі розглянуто можливість отримання зварного з'єднання алюмініду титану зі сталлю.

Титан з основними елементами нержавіючої сталі (залізом, хромом, нікелем) має обмежену взаємну розчинність, утворює інтерметаліди та низькотемпературні евтектики, що виключає можливість безпосереднього з'єднання титану зі сталлю всіма відомими способами зварювання плавленням – зварні шви виходять крихкі. Завдання щодо зварювання титану зі сталлю може бути вирішена лише шляхом використання проміжних вставок. Титан задовільно зварюється з дуже обмеженою кількістю металів: цирконієм, гафнієм, ніобієм, танталом, ванадієм.

У літературі найбільш широко висвітлено питання з'єднання титану зі сталлю зварюванням у твердій фазі, тобто без розплавлення контактуючих металів. Можливість з'єднання титану безпосередньо з залізом і сталлю, тобто без прошарків, вивчалася для випадків ДЗВ [2], пресового зварювання [3], зварювання вибухом [4], зварювання тертям [5] та інших.

Найбільш перспективним способом зварювання титану зі сталлю є зварювання тиском з використанням проміжних прошарків з інших металів. Одиарні прошарки не вирішують завдання одержання працездатного зварного біметалічного вузла при температурах вище 400 °С, тому що в зоні контакту відбувається ріст крихкого перехідного шару, що містить або карбіди, або інтерметаліди, або обидва типи хімічних сполук одночасно.

Двошарові прошарки ніобій-мідь застосовуються при зварюванні титану із сталлю вибухом [6], дифузійному зварюванні [7], зварюванні прокаткою [8]. Ніобій з міддю інтерметалідних з'єднань не утворюють, мають слабку взаємну розчинність і зварювання цих металів серйозних ускладнень не викликає. При оптимальних умовах з'єднання має високу міцність і задовільну пластичність. При низьких температурах (до 268,8 °С) і при високих температурах (до 1000 °С) випробування руйнування з'єднань відбувається по шару міді [6].

Однак прошарки ніобій-мідь також мають істотні недоліки. Шари ніобію, міді, а також сталі і титану мають дуже різні коефіцієнти лінійного розширення, що призводить до появи тріщин у шарі міді при термоциклічних режимах роботи вузлів [9]. Таким чином, необхідно знизити рівень напружень за рахунок зниження різниці в значеннях коефіцієнтів лінійного розширення металів, що з'єднуються. При дифузійному зварюванні вибір опти-

мальних режимів ускладнюється, тому що ніобій при температурах близько 1000 °С непластичний, у той час як при цих температурах титан і мідь мають низькі показники міцності.

Змінюючи товщину проміжного шару міді, тобто м'якого шару, можна керувати ступенем контактного зміцнення цього шару, одержуючи необхідні показники механічних властивостей зварного вузла в цілому. Істотний недолік такої технології – це низька температура плавлення прошарку з міді та її сплавів.

**Формування цілей статті.** Метою роботи є розробка технології дифузійного зварювання у вакуумі інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl зі сталлю 12X18H10T.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Об'єктом досліджень були інтерметалідний сплав  $\gamma$ -TiAl (Ti – 31-33 % Al – 2-3 % Cr – 3-4 % Nb, % мас.) і нержавіюча сталь 12X18H10T. Для усунення перегріву металу заготовки зі сталі й інтерметаліду розрізали на зразки розміром 15 × 15 × 5 мм за допомогою електроерозійного верстата. Зварювання зразків проводили способом дифузійного зварювання у вакуумі.

Поверхні зразків, що підлягали зварюванню, шліфували на алмазному колі і безпосередньо перед зварюванням знежирювали ацетоном. Зварювання зразків проводили в стик у вільному стані. Для усунення утворення крихких інтерметалідів у зоні з'єднання застосовували прошарки у вигляді фольг суцільного перетину: Ti – 100 мкм, Cu – 50 мкм, Nb – 50 мкм.

Послідовність елементів для зварювання була наступна:  $\gamma$ -TiAl – Ti – Nb – Cu – 12X18H10T.

Оптимальною температурою для зварювання інтерметалідного сплаву  $\gamma$ -TiAl є температура  $T = 1200$  °С, але при цих умовах відбувається розплавлення міді, що негативно впливає на якість зварних з'єднань [10]. Тому було запропоновано двохстадійний процес зварювання інтерметаліду  $\gamma$ -TiAl із сталлю 12X18H10T. Спочатку при температурі  $T = 1200$  °С проводили зварювання алюмініду титану з титаном та ніобієм, а потім до отриманого з'єднання при температурі  $T = 1000$  °С приварювали через прошарок міді сталь 12X18H10T.

Циклограма процесу дифузійного зварювання наведена на рис. 1. Тиск зварювання на обох стадіях становив  $P = 20$  МПа, час витримки  $t = 20$  хв.

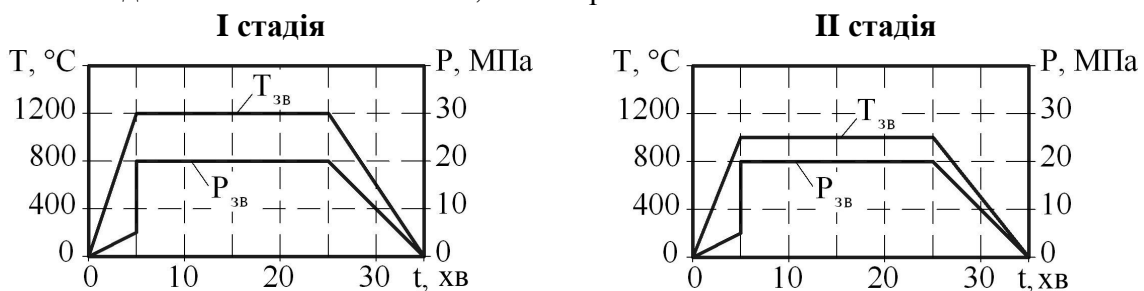


Рис. 1. Циклограма процесу дифузійного зварювання у вакуумі  $\gamma$ -TiAl

Металографічні дослідження з'єднань, отриманих при дифузійному зварюванні у вакуумі  $\gamma$ -TiAl – Ti – Nb – Cu – 12X18H10T, показали, що в зоні з'єднання дефектів у вигляді пор, тріщин не виявлено. На рис. 2 представлена мікроструктура зварного з'єднання, отриманого в режимі зворотно розсіяних електронів на нетравленому шліфі. Як видно з рисунка (рис. 2) і розподілу елементів (табл. 1), у процесі зварювання у стик активно відбуваються дифузійні процеси з утворенням з боку інтерметаліду широкої зони об'ємної взаємодії. Між інтерметалідним сплавом  $\gamma$ -TiAl і прошарками титану та ніобію відбувається плавне вирівнювання складу.

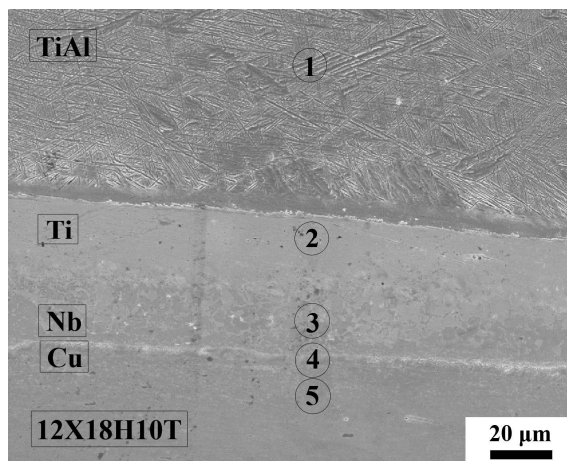


Рис. 2. Мікроструктура зварного з'єднання  $\gamma$ -TiAl зі сталлю 12X18H10T, отриманого із застосуванням прошарків: титану, ніобію та міді, х600 електронна мікроскопія

Таблиця 1

Локальний аналіз хімічного складу елементів у зоні з'єднання TiAl зі сталлю 12X18H10T через прошарки суцільного перетину: титану, ніобію і міді

№ точки	Вміст елементів, % мас.						
	Ti	Al	Nb	Fe	Cr	Ni	Cu
1	62,88	31,52	2,24	0,00	3,36	0,00	0,00
2	80,27	4,87	14,86	0,00	0,00	0,00	0,00
3	13,14	0,91	74,92	0,00	0,00	0,00	11,03
4	3,98	0,00	12,46	12,71	1,40	2,24	67,21
5	1,27	0,00	0,00	69,56	18,50	10,67	0,00

Дослідження розподілу мікротвердості в напрямку перпендикулярному до зони з'єднання  $\gamma$ -TiAl – 12X18H10T (рис. 3) показали підвищення мікротвердості до 4050 МПа в дифузійній зоні  $\gamma$ -TiAl з прошарком титану за рахунок дифузії алюмінію у бік титану. Прошарок титану має підвищені показники мікротвердості до 2800 ... 4050 МПа внаслідок дифузії як алюмінію, так і ніобію (табл. 1, т. 2).

З боку нержавіючої сталі в зоні з'єднання з мідним прошарком спостерігається зниження мікротвердості до 1100 МПа, що відповідає мікротвердості міді.

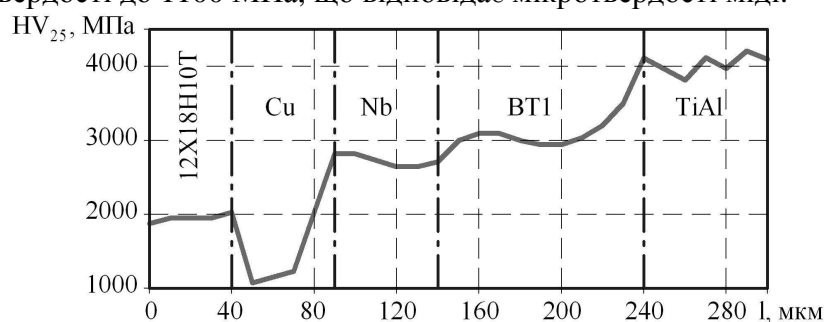


Рис. 3. Розподіл мікротвердості в зоні з'єднання  $\gamma$ -TiAl – 12X18H10T із проміжними прошарками Ti, Nb, Cu суцільного перетину

**Висновки дослідження.** Проведені дослідження показують, що застосування двох-стадійного процесу зварювання  $\gamma$ -TiAl з нержавіючою сталлю з використанням проміжних прошарків з титану, ніобію та міді дозволяє отримати бездефектні з'єднання.

#### Список використаних джерел

1. Механические свойства литых сплавов  $\gamma$ -TiAl / О. А. Банных, К. Б. Поварова, Г. С. Браславская [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 4. – С. 11-14.
2. Биметаллические соединения / К. Е. Чарухина, С. А. Голованенко, В. А. Мастеров, Н. Ф. Казаков. – М.: Металлургия, 1970. – 280 с.

3. Причины снижения прочности сварных соединений титана со сталью / Л. Н. Ларионов, М. Н. Белякова, В. Н. Замков [и др.] // Автоматическая сварка. – 1984. – № 4. – С. 17-20.
4. Седых В. С. Особенности микронеоднородности сваренных взрывом соединений / В. С. Седых // Труды Волгоградского политехнического института. – 1975. – Вып. 2. – С. 3-39.
5. О возможности регулирования температуры при сварке трением разнородных материалов / Ю. Д. Потапов, В. В. Трутнев, А. Ф. Якушин [и др.] // Сварочное производство. – 1971. – № 2. – С. 1-3.
6. Влияние низких температур на работоспособность сваренных взрывом титано-стальных соединений / Ю. Н. Кусков, В. Д. Сапрыгин, В. С. Седых [и др.] // Сварочное производство. – 1975. – № 11. – С. 20-21.
7. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук, Г. К. Харченко [и др.]. – 2-е изд., дополн. и перераб. – К.: Наук. думка, 1986, – С. 240.
8. Свойства соединений титановых сплавов со сталью, полученных через тонкие металлические прослойки / В. Е. Иванов, В. М. Амоненко, В. М. Годин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1971. – № 2. – С. 101-104.
9. Тронь А. С. Влияние циклических нагревов на свойства соединения разнородных металлов / А. С. Тронь, Л. А. Забашта, А. Г. Лопата // Проблемы прочности. – 1975. – № 12. – С. 57-60.
10. Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system / A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, A. Ya. Ishchenko, G. K. Kharchenko, T. V. Melnichenko, A. N. Muraveynik // Intermetallics. – 2008. – № 16. – P. 1043-1045.

УДК 621.791.01.6

**Г.П. Болотов**, д-р техн. наук

**М.Г. Болотов.**, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ

*Проведено аналіз енергетичних та регулювальних характеристик існуючих джерел живлення тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання. Показано недоліки конструктивних схем джерел та визначено засоби їх оптимізації.*

*Проведен анализ энергетических и регулировочных характеристик существующих источников питания тлеющего разряда для диффузионной сварки. Показано недостатки конструктивных схем источников и определено способы их оптимизации.*

*The analysis of energy characteristics and regulation of existing sources of supply for the glow discharge for the diffusion welding. Showing disadvantages of constructive schemes of sources and identify ways to optimize them.*

**Вступ.** Сьогодні у промисловості широко розповсюдження отримало зварювання у твердій фазі – дифузійне зварювання, що здійснюється при температурах нижче температури розплавлення з'єднуваних матеріалів [1]. Це дозволяє отримувати вузли та деталі складної форми з мінімальними деформаціями. Для дифузійного зварювання застосовують різні види джерел нагріву, що розрізняються способами перетворення електричної енергії у теплову, інтенсивністю та локальністю нагріву. Одним з таких джерел є тліючий розряд, який має певні технологічні переваги серед інших способів нагріву, пов'язаних, зокрема, із простотою обладнання, високою економічною ефективністю процесу нагріву, можливістю зварювання виробів різноманітних конструктивних форм. Особливістю застосування тліючого розряду є можливість суміщення в єдиному циклі операцій іонного очищення зварюваних поверхонь, зварювання та термохімічної обробки зварних виробів, що забезпечує підвищення якості з'єднань.

**Постановка завдання.** Тліючий розряд, подібно до дугового, є однією з форм газового розряду. Електрична дуга завдяки значній густині струму в катодній та анодній плямах і високій температурі газу в позитивному стовпі широко застосовується для