

КОНТАКТНЕ СТИКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ОПОРОМ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ γ -TiAl ЗІ СПЛАВОМ ВТ5*

С. І. КУЧУК-ЯЦЕНКО, І. В. ЗЯХОР, А. О. НАКОНЕЧНИЙ, М. С. ЗАВЕРТАННИЙ, Л. М. КАПІТАНЧУК
ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі досліджувались особливості формування різнорідних з'єднань сплаву Ti-46Al-2Cr-2Nb на основі алюмініду титану γ -TiAl з титановим сплавом ВТ5 при контактному стиковому зварюванні опором, зокрема, з використанням проміжних прошарків у вигляді нанощаруватих фольг. При контактному стиковому зварюванні опором без використання нанощаруватих фольг не вдалось забезпечити бездефектність з'єднань — у стиках фіксувалась наявність ділянок литого металу і тріщин. Встановлено, що використання у якості проміжного прошарку нанощаруватих фольг евтектичного типу систем Ti/Cu і Cu-Ti/Ni-Cu суттєво впливає на процеси активації поверхонь, що зварюються, і формування з'єднань при контактному стиковому зварюванні опором. Наявність нанощаруватих фольг у зоні контакту сприяє утворенню тонкого шару рідкої фази на початковій стадії процесу нагрівання, локалізації процесу тепловиділення, активації поверхонь обох сплавів при тривалості стадії нагрівання 50...60 % від такої при безпосередньому контактному стиковому зварюванні опором сплавів γ -TiAl і ВТ5. Двоступенева циклограма тиску забезпечує формування бездефектних з'єднань при значеннях температури нагрівання, нижчих за температуру ліквідусу у системі Ti-Al. За даними скануючої електронної мікроскопії і EDS-аналізу встановлено відсутність у зоні з'єднань ділянок литого металу і залишків нанощаруватих фольг, що свідчить про твердофазний характер формування з'єднань і повне витіснення нанощаруватих фольг за межі перерізу заготовок. Бібліогр. 12, рис. 8.

Ключові слова: алюмінід титану, сплав ВТ5, контактне стикове зварювання опором, нанощарувата фольга, твердофазне з'єднання

Перспективними матеріалами для виготовлення компонентів авіаційних і автомобільних двигунів є сплави на інтерметалідній основі, зокрема алюмініди титану [1–5]. Завдяки низькій питомій вазі та високим характеристикам жароміцності алюмініди титану та сплави на їх основі мають переваги порівняно з існуючими титановими і нікелевими сплавами в широкому інтервалі температур. Передбачається використання алюмінідів титану для виготовлення клапанів автомобільних двигунів [2] та деталей авіаційних двигунів, що працюють при високих температурах [4].

Однією із причин, що стримує використання інтерметалідних сплавів, є складність їх технологічної обробки, зокрема зварювання, обумовлена надзвичайно низькою пластичністю при кімнатній температурі, високою чутливістю до термічного та деформаційного циклів обробки [6]. Перспективними для нероз'ємного з'єднання інтерметалідних сплавів у однорідному та різнорідному сполученнях є використання способів зварювання тиском [7–11], зокрема контактного стикового зварювання опором (КСЗО) [10, 11]. Розробка ефективної технології КСЗО інтерметалідних сплавів пов'язана з низкою проблем, зокрема, з нерівномірністю процесів нагрівання і деформації

приконттактних об'ємів матеріалів, значним опором пластичній деформації, високим електричним опором і великим температурним інтервалом крихкості цих сплавів.

Ефективним технологічним прийомом, що сприяє активації зварюваних поверхонь та інтенсифікації дифузійних процесів в зоні з'єднання, є застосування проміжних прошарків. У якості таких прошарків можуть бути використані нанощаруваті фольги (НФ) на основі реакційних елементів, які входять до складу матеріалів, що зварюються [9–11]. Для зварювання різнорідних матеріалів актуальним є використання проміжних прошарків, які будуть здатні, з одного боку, сприяти встановленню фізичного контакту, а з іншого — завадити змішуванню елементів, які входять до складу матеріалів, що зварюються. Таким чином відповідають проміжні прошарки у вигляді НФ з неоднорідним по товщині розподілом параметрів структури.

Попередній досвід свідчить про ефективність використання НФ у якості прошарків та активаторів при КСЗО сплавів на основі алюмінідів титану у однорідному сполученні. Позитивний ефект використання НФ виявляється в локалізації процесів тепловиділення та деформації у зоні контакту, що сприяє активації поверхонь, що зварюються, і забезпечує формування з'єднань при суттєво менших значеннях енерговкладення [11].

*За матеріалами доповіді на Міжнародній конференції «Титан 2018. Виробництво та застосування в Україні», 11–13 червня 2018, Київ, ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.

Метою досліджень було встановлення особливостей формування різномірних з'єднань сплаву на основі γ -алюмініду титану із високоміцним титановим сплавом при КСЗО — безпосередньому і з використанням НФ з неоднорідним розподілом параметрів структури.

Досліджували вплив режимів КСЗО на формування з'єднань алюмініду титану Ti-46Al-2Cr-2Nb (γ -TiAl) з титановим сплавом BT5 (далі — з'єднання γ -TiAl+BT5). Розроблено комплексну методику досліджень, що передбачала отримання зварних з'єднань за різними технологічними схемами — при безпосередньому КСЗО і КСЗО з використанням НФ різного хімічного складу. Для проведення досліджень модернізовано машину K766 з метою забезпечення високої швидкодії механізму стиснення і прецизійного керування зусиллям стиснення під час пропускання зварувального струму. Діапазон зміни технологічних параметрів був оптимізований на підставі попередніх експериментів таким чином, щоб забезпечити задану величину осадки при зварюванні. Параметри режиму КСЗО змінювали в межах: тиск при нагріванні $P = 2 \dots 10$ МПа, тиск при осадці $10 \dots 50$ МПа, час зварювання $1,5 \dots 3,5$ с.

Структуру з'єднань, наявність дефектів визначали металографічними дослідженнями шліфів, підготовлених з використанням хімічного методу виявлення структури. Проводили оптичну мікроскопію («Neophot-32»), растрову електронну мікроскопію (ОЖЕ-мікрозонд JAMP-9500F та скануючий електронний мікроскоп JSM-35CA, «JEOL»), мікрорентгеноспектральний аналіз розподілу елементів (EDS-аналізатор «INCA-450», «Oxford Instruments»), вимірювання мікротвердості (M400, «LECO», при навантаженні $1 \dots 5$ Н). Механічні властивості з'єднань оцінювалися за розподілом мікротвердості металу у зоні з'єднання і зоні термомеханічного впливу стиків.

Для проведення експериментів по КСЗО із застосуванням проміжних прошарків вибрано НФ системи Ti/Al та фольги з нерівномірним розподілом параметрів структури двох типів: дискретного (TiNb/Al, Ni/Ti-Al, Ti/Ni-Cu, Ni-Ti/Cu-Ni, Ti-Al/Ni-Ti, Al/Ni-Cu) і градієнтного (Cu/

Ti). Товщина НФ становила $30 \dots 60$ мкм, товщина кожного шару — $10 \dots 50$ нм. Мікроструктуру і результати мікрорентгеноспектрального аналізу НФ Al/Ni-Cu, Cu/Ti та Cu-Ti/Ni-Cu по їх товщині представлено на рис. 1.

Суттєвою характеристикою фольг дискретного типу, які використовувались у якості проміжного прошарку при КСЗО, є матеріал зовнішніх шарів. Згідно методики досліджень передбачалось, що використання НФ дискретного типу із зовнішнім шаром, який має відмінні теплофізичні характеристики від зварюваних сплавів, повинно суттєво впливати на процеси нагрівання, деформації, характер та інтенсивність протікання дифузійних процесів у зоні контакту при зварюванні.

Так, для НФ Ti-Al/Ni-Ti зовнішній шар (титан) відповідав основі обох сплавів, що зварюються; для НФ Cu-Ti/Ni-Cu та Ni-Al/Ni-Ni зовнішні шари (мідь і нікель) утворюють з основою обох сплавів низькоплавку евтектику. Передбачалось, що при металографічних дослідженнях з'єднань різниця у виявленні структури НФ і основного металу сплавів дозволить встановити закономірності поведінки у процесі зварювання приконттактних об'ємів металу і матеріалу проміжного прошарку.

Досліджували вплив режимів КСЗО у широкому діапазоні зміни технологічних параметрів на формування з'єднань γ -TiAl+BT5. Структуру зони з'єднання, одержаного при КСЗО на оптимальному режимі без використання проміжних прошарків, показано на рис. 2, а, б відповідно у центральній і периферійній частинах перерізу заготовок. Відмічається наявність ділянок литого металу і мікротріщин у зоні з'єднання.

Аналіз результатів осцилографування величини зварувального струму і вимірювання температури термопарами свідчать, що у даному випадку в процесі КСЗО формування з'єднання відбувалось через шар розплаву, який кристалізувався після стадії деформації заготовок у процесі охолодження. При безпосередньому КСЗО без розплавлення забезпечити формування з'єднання сплавів γ -TiAl+BT5 не вдалось — у стиках фіксувались дефекти типу оксидних плівок та непроварів.

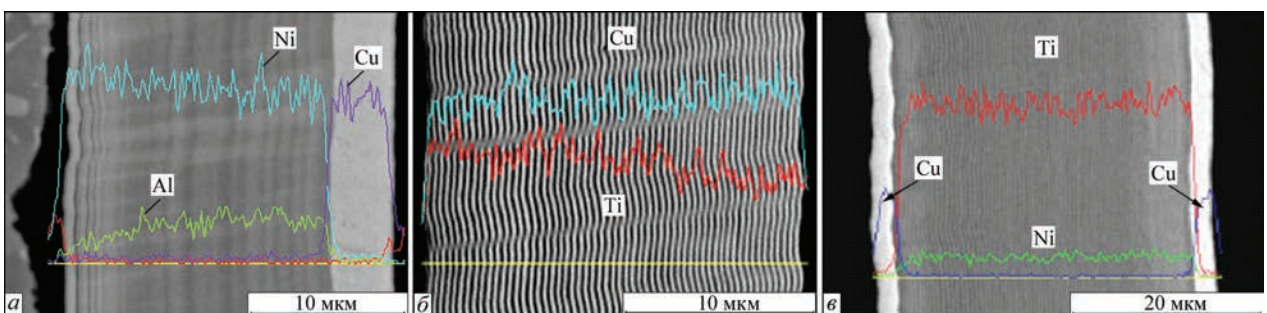


Рис. 1. Електронно-мікроскопічне зображення та розподіл компонентів у НФ систем Al/Ni-Cu (а), Cu/Ti (б), Cu-Ti/Ni-Cu (в)

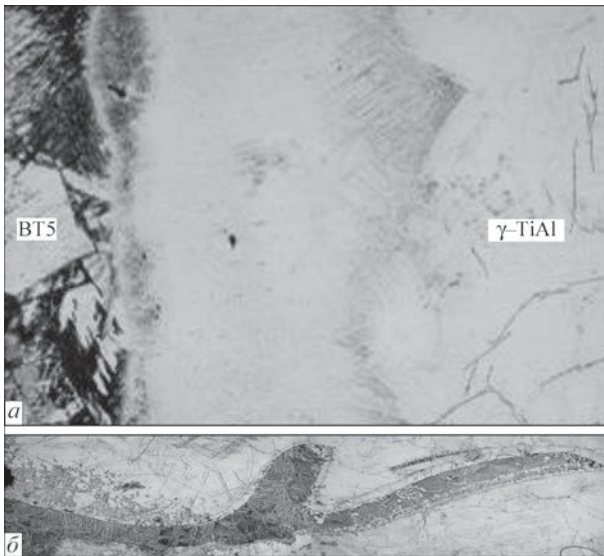


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 100$) з'єднання сплавів γ -TiAl+BT5 при безпосередньому КСЗО: центральна частина перерізу (а), периферійна частина перерізу (б)

Досліджували вплив режимів КСЗО на структуру з'єднань сплавів γ -TiAl+BT5, одержаних через НФ системи Ti/Al. Температурно-часові параметри процесу зварювання забезпечували перевищення у контактній зоні температури плавлення сплавів γ -TiAl ($T_{\text{ліквідус}} = 1475^\circ\text{C}$) і BT5 ($T_{\text{ліквідус}} = 1670^\circ\text{C}$) згідно з діаграмою стану системи Ti-Al (рис. 3) [12]. При цьому осьове зусилля на стадії осадки не підвищувалось (одноступенева циклограма тиску). Встановлено, що при охолодженні на повітрі з'єднань γ -TiAl+BT5, одержаних КСЗО з одноступеневою циклограмою тиску, у зварних стиках утворюються тріщини безпосередньо по дифузійній зоні або у прилеглих до неї ділянках сплаву γ -TiAl (рис. 4, а), очевидно, внаслідок структурних перетворень «розплав \rightarrow α -фаза \rightarrow ($\alpha + \gamma$) \rightarrow ($\alpha_2 + \gamma$)», які супроводжуються виникненням значних зварювальних напружень.

Досліджували структуру з'єднань сплавів γ -TiAl+BT5, одержаних КСЗО через НФ системи Ti/Al з двоступеневою циклограмою тиску, коли у зоні контакту також досягалась температура пла-

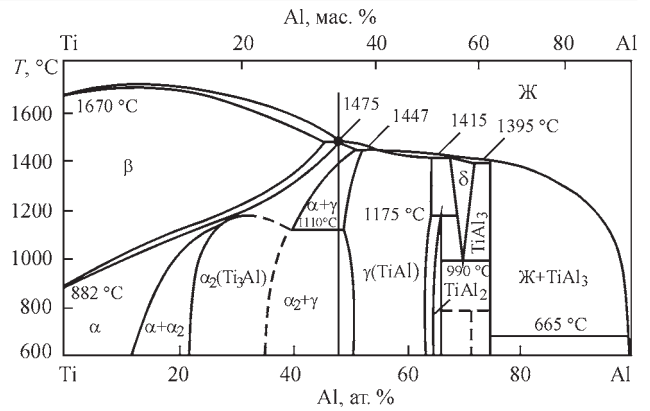


Рис. 3. Діаграма стану системи Ti-Al [12]

влення сплаву γ -TiAl. При аналізі мікроструктури з'єднання спостерігається утворення спільних зерен на границі контакту сплавів γ -TiAl+BT5 (рис. 4, б).

Очевидно, у процесі нагрівання при КСЗО забезпечувалось короточасне локальне досягнення температури ліквідус сплавів, при цьому ділянки розплаву кристалізувались на стадії деформації заготовок в процесі осадки. У цьому випадку забезпечувався твердофазний характер формування з'єднання γ -TiAl+BT5 у α -області діаграми стану системи Ti-Al. Реєстрацією термічних циклів за допомогою термопар встановлено, що використання НФ забезпечує локалізацію виділення тепла у зоні контакту (по осі заготовок) і більш рівномірне тепловиділення по перерізу заготовок у порівнянні з КСЗО без використання НФ.

Оксидних плівок, пор, тріщин та інших дефектів у зоні з'єднання не виявлено. Аналіз мікроструктури з'єднання показує наявність дифузійної зони шириною більше 100 мкм, в якій вміст титану поступово зменшується приблизно від 93 ат. % у сплаві BT5 до 50 ат. % у сплаві γ -TiAl, що обумовлює згідно з діаграмою стану системи Ti-Al існування декількох фаз різного складу — α (Ti), $\alpha + \alpha_2$, α_2 (Ti_3Al), $\alpha_2 + \gamma$ (TiAl). Характер зміни мікротвердості у зоні з'єднання γ -TiAl+BT5 (рис. 5) свідчить про відсутність ділянок з пониженою міцністю у зоні термічного впливу обох сплавів.

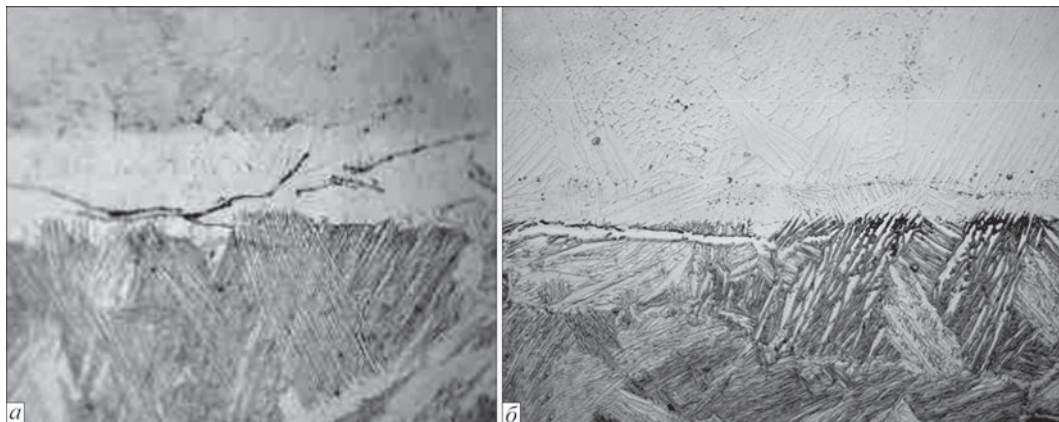


Рис. 4. Мікроструктура ($\times 200$) з'єднання γ -TiAl+BT5 при КСЗО через НФ системи Ti/Al при одно- (а) та двоступінчастій (б) циклограмі тиску (сплав BT5 на фотографії знизу)

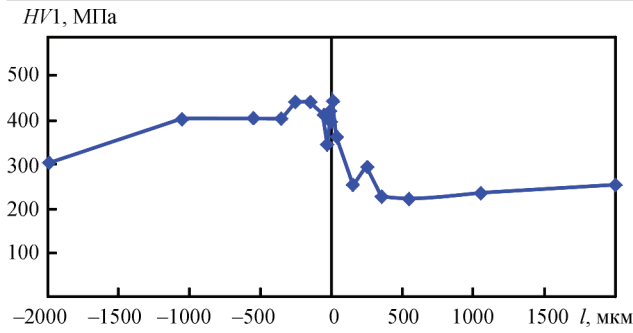


Рис. 5. Зміна мікротвердості у з'єднанні γ -TiAl+BT5 при КСЗО через НФ Ti/Al

Наявність широкої дифузійної зони є суттєвим фактором, що може впливати на механічні характеристики зварних стиків, зокрема, на утворення тріщин при їх термічній обробці або експлуатаційних навантаженнях.

Досліджували вплив режимів КСЗО на структуру з'єднань γ -TiAl+BT5, одержаних з використанням НФ евтектичного типу з нерівномірним розподілом по товщині параметрів структури: дискретних (Ni/Ti–Al, Ti/Ni–Cu, Cu–Ti/Ni–Cu, Al/Ni–Cu) і градієнтних (Ti/Al, Cu/Ti). Технологічні параметри режиму КСЗО встановлювали такими, щоб забезпечити у зоні контакту короточасне перевищення температури евтектики у системі титан — матеріал зовнішнього шару НФ.

Зокрема, для НФ системи Cu–Ti/Ni–Cu і Cu/Ti температура нагрівання в процесі КСЗО повинна короточасно перевищувати значення $T_{\text{евт. Cu-Ti}} = 885^\circ\text{C}$ згідно з діаграмою стану системи Cu–Ti [12]. При цьому температурно-часові умови процесу КСЗО (величини напруги, струму, часу, тиску при нагріванні, тиску осадки) контролювали

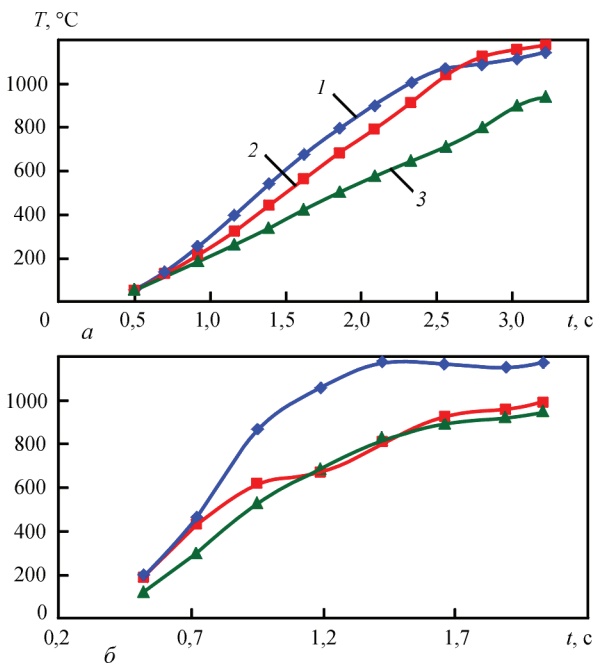


Рис. 6. Зміна температури нагрівання на відстані від стику 1,5 (1), 2,5 (2), 3,5 (3) мм при КСЗО сплавів γ -TiAl+BT5 через НФ Cu–Ti/Ni–Cu (а) і Cu/Ti (б)

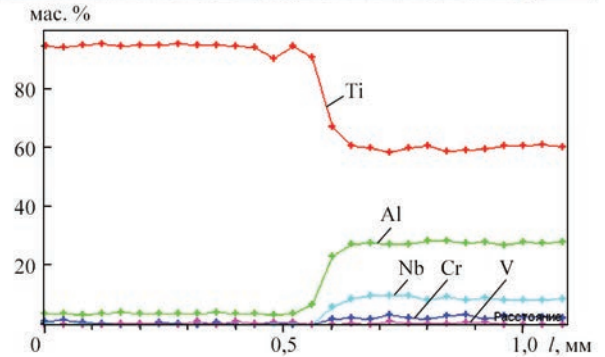
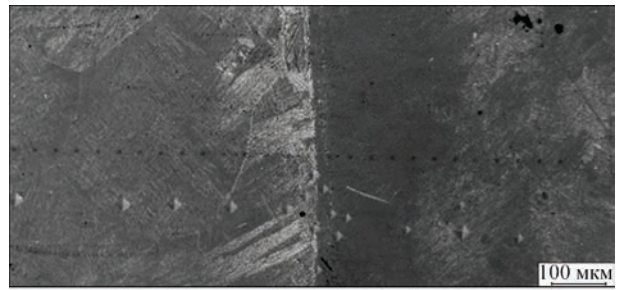
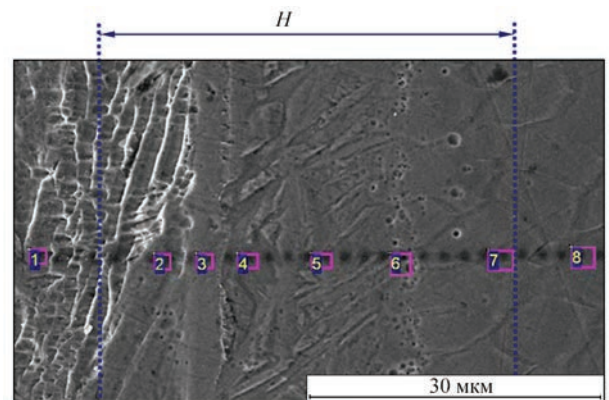


Рис. 7. СЕМ зображення мікроструктури і результати МРСА зони з'єднання γ -TiAl+BT5 при КСЗО через НФ Cu–Ti/Ni–Cu

таким чином, щоб запобігти перевищенню у контактній зоні температури плавлення сплаву γ -TiAl (рис. 6). Процес формування з'єднання при цьому відбувається у α -області або (α + γ)-області згідно діаграми стану системи Ti–Al.

Експерименти показали, що оптимальні умови формування з'єднань при КСЗО забезпечуються при використанні НФ систем Cu–Ti/Ni–Cu і Cu/Ti. Мікроструктура з'єднання γ -TiAl+BT5 при скануючій електронній мікроскопії (СЕМ) і результати



Спектр	C	Al	Ti	V	Cr	Nb
1	1,27	5,32	93,15	0,15	0,10	0
2	0,75	12,03	86,31	0,66	0,15	0,11
3	0,91	14,46	84,44	0	0,08	0,12
4	0,95	17,99	80,44	0,13	0,24	0,25
5	0,76	20,68	76,47	0	0,76	1,33
6	0,96	22,54	71,15	0	1,46	3,89
7	1,04	25,46	66,13	0	0,99	6,38
8	0,77	25,87	62,98	0,05	2,09	8,23

Рис. 8. Мікроструктура та хімічний склад металу різних ділянок у зоні з'єднання γ -TiAl+BT5 при КСЗО через НФ Cu–Ti/Ni–Cu, мас. %, H — ширина дифузійної зони

мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) представлені на рис. 7, 8.

Встановлено, що використання НФ суттєво впливає на процеси активації поверхонь, що зварюються, і формування з'єднань. Використання НФ систем Cu–Ti/Ni–Cu і Cu/Ti при КСЗО з двоступеневою циклограмою тиску сприяє утворенню тонкого шару рідкої фази на початковій стадії процесу нагрівання, локалізації процесу тепловиділення, активації поверхонь обох сплавів та формуванню бездефектних з'єднань на стадії осадки при тривалості стадії нагрівання 50...60 % від такої при безпосередньому КСЗО. За допомогою СЕМ (ОЖЕ-мікрозонд JAMP-9500F, «Jeol», EDS-аналізатор «INCA-450») встановлено відсутність у зоні з'єднань ділянок литого металу, залишків НФ, що свідчить про твердофазний характер формування з'єднань і повне витіснення НФ за межі перерізу заготовок. Ширина дифузійної зони у з'єднанні γ -TiAl+BT5 не перевищує 50 мкм (рис. 8).

Висновки

1. При контактному стиковому зварюванні опром (КСЗО) сплаву γ -TiAl з титановим сплавом BT5 без використання проміжних прошарків не вдалось забезпечити бездефектність з'єднань – у стиках фіксувалась наявність ділянок литого металу і тріщин. Формування з'єднання відбувалось через шар розплаву, який кристалізувався після стадії деформації заготовок у процесі охолодження стиків.

2. У стиках, виконаних КСЗО через НФ системи Ti/Al при одноступеневій циклограмі тиску, утворюються тріщини безпосередньо по дифузійній зоні або у прилеглих до неї ділянках сплаву γ -TiAl, очевидно внаслідок структурних перетворень «розплав \rightarrow α -фаза \rightarrow ($\alpha+\gamma$) \rightarrow ($\alpha_2 + \gamma$)», які супроводжуються виникненням значних зварювальних напружень.

3. Двоступенева циклограма тиску при КСЗО через НФ системи Ti/Al забезпечує формування бездефектних з'єднань. Наявність дифузійної зони шириною більше 100 мкм є суттєвим фактором, що може впливати на механічні характеристики зварних стиків, зокрема, на утворення тріщин при їх термічній обробці або експлуатаційних навантаженнях.

4. Використання у якості проміжного прошарку НФ евтектичного типу системи Ti/Cu і Cu–Ti/Ni–Cu суттєво впливає на процеси активації поверхонь, що зварюються, і формування з'єднань при КСЗО. Наявність НФ у зоні контакту сприяє утворенню тонкого шару рідкої фази на початковій стадії процесу нагрівання, локалізації процесу тепловиділення, активації поверхонь обох сплавів при тривалості стадії нагрівання 50...60 %

від такої при безпосередньому КСЗО сплавів γ -TiAl і BT5.

5. При КСЗО з двоступеневою циклограмою тиску забезпечується формування бездефектних з'єднань при значеннях температури нагрівання, нижчих за температуру ліквідус у системі Ti–Al. За даними МРСА встановлено відсутність у зоні з'єднань ділянок литого металу і залишків НФ, що свідчить про твердофазний характер формування з'єднань і повне витіснення НФ за межі перерізу заготовок.

Список літератури

1. Chesnutt J., Hall J., Lipsitt H. (1995) Titanium intermetallics – present and future. *Proceedings of the Eighth World Conference of Titanium, Birmingham, UK, 22–26 October 1995*. The Institute of Materials, pp. 70–79.
2. S. Hurta, H. Clemens, G. Frommeyer et al. (1995) Valves of intermetallic γ -TiAl-based alloys: processing and properties. *Ibid*, pp. 97–104.
3. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшин И. С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС–МАТИ.
4. Каблов Е. Н., Лукин В. И. (2008) Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники. *Автоматическая сварка*, **11**, 76–82.
5. Григоренко С. Г., Григоренко Г. М., Задорожнюк О. М. (2017) Интерметаллиды титана. Особенности, свойства, применение (Обзор). *Современная электрометаллургия*, **3**, 51–58.
6. Jian Cao, Junlei Qi, Xiaoguo Song and Jicai Feng (2014) Welding and Joining of Titanium Aluminides. *Materials*, **7**, 4930–4962.
7. Юштин А. Н., Замков В. Н., Сабокаръ В. К. и др. (2001) Сварка давлением интерметаллидного сплава γ -TiAl. *Автоматическая сварка*, **1**, 33–37.
8. Сабокаръ В. К., Ахонин С. В., Петриченко И. К. и др. (2009) Прессовая сварка алюминидов титана с другими титановыми сплавами. *Там же*, **2**, 15–17.
9. Горбань В. Ф., Харченко Г. К., Фальченко Ю. В. и др. (2009) Исследование соединений титана с титановым сплавом BT8, полученных диффузионной сваркой. *Там же*, **2**, 11–14.
10. Кучук-Яценко В. С., Швец В. И., Сахацкий А. Г. и др. (2009) Особенности контактной сварки алюминидов титана с использованием нанослойных алюминидово-титановых фольг. *Там же*, **3**, 19–22.
11. Кучук-Яценко С. И., Зяхор И. В., Чернобай С. В. и др. (2015) Формирование соединений алюминидов титана γ -TiAl при сварке давлением с использованием нанослойных фольг. *Там же*, **9**, 7–14.
12. Барабаш О. М., Коваль Ю. Н. (1986) *Кристаллическая структура металлов и сплавов*. Справочник. Киев, Наукова думка.

References

1. Chesnutt, J., Hall, J., Lipsitt, H. (1995) Titanium intermetallics – present and future. In: Proc. of 8th World Conf. of Titanium (UK, Birmingham, 22-26 October, 1995). *The Institute of Materials*, 70-79.
2. Hurta, S., Clemens, H., Frommeyer, G. et al. Valves of intermetallic γ -TiAl-based alloys: Processing and Properties. *Ibid.*, 97-104.
3. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*. In: Refer. book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
4. Kablov, E.N., Lukin, V.I. (2008) Intermetallics based on titanium and nickel for advanced engineering products. *The Paton Welding J.*, **11**, 65-70.

5. Grigorenko, S.G., Grigorenko, G.M., Zadorozhnyuk, O.M. (2017) Intermetallics of titanium. Peculiar features, properties, application (Review). *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 51-58 [in Russian].
6. Jian Cao, Junlei Qi, Xiaoguo Song, Licai Feng (2014) Welding and joining of titanium aluminides. *Materials*, **7**(7), 4930-4962.
7. Yushtin, A.N., Zamkov, V.N., Sabokar, V.K. et al. (2001) Pressure welding of intermetallic alloy γ -TiAl. *The Paton Welding J.*, **1**, 33-37.
8. Sabokar, V.K., Akhonin, S.V., Petrichenko, I.K. et al. (2009) Pressure welding of titanium aluminide to other titanium alloys. *Ibid.*, **1**, 10-12.
9. Gorban, V.F., Kharchenko, G.K., Falchenko, Yu.V. et al. (2009) Investigation of joints of titanium aluminide with titanium alloy VT8 produced by diffusion welding. *Ibid.*, **1**, 7-9.
10. Kuchuk-Yatsenko, V.S., Shvets, V.I., Sakhatsky, A.G. et al. (2009) Features of resistance welding of titanium aluminides using nanolayered aluminium-titanium foils. *Ibid.*, **3**, 11-14.
11. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Zyakhor, I.V., Chernobaj, S.V. et al. (2015) Structure of γ -TiAl joints in resistance butt welding with application of interlayers. *Ibid.*, **9**, 5-12.
12. Barabash, O.M., Koval, Yu.N. (1986) *Crystalline structure of metals and alloys*. In: Refer. book. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА СОПРОТИВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИДА ТИТАНА γ -TiAl СО СПЛАВОМ ВТ5

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, И. В. ЗЯХОР, А. А. НАКОНЕЧНЫЙ, М. С. ЗАВЕРТАННЫЙ, Л. Н. КАПИТАНЧУК

ІЭС ім. Е. О. Патона НАН України. 03150, г. Київ, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе исследовались особенности формирования разнородных соединений сплава Ti-46Al-2Cr-2Nb на основе алюминид титана γ -TiAl с титановым сплавом ВТ5 при контактной стыковой сварке сопротивлением, в частности, с использованием промежуточных слоев в виде нанослоистых фольг. При контактной стыковой сварке сопротивлением без использования нанослоистых фольг не удалось обеспечить бездефектность соединений — в стыках фиксировалось наличие участков литого металла и трещин. Установлено, что использование в качестве промежуточного слоя нанослоистых фольг эвтектического типа систем Ti/Cu и Cu-Ti/Ni-Cu существенно влияет на процессы активации свариваемых поверхностей и формирование соединений при контактной стыковой сварке сопротивлением. Наличие нанослоистых фольг в зоне контакта способствует образованию тонкого слоя жидкой фазы на начальной стадии процесса нагрева, локализации процесса тепловыделения, активации поверхностей обоих сплавов при продолжительности стадии нагрева 50...60 % от таковой при непосредственной контактной стыковой сварке сопротивлением сплавов γ -TiAl и ВТ5. Двухступенчатая циклограмма давления при этом способе обеспечивает формирование бездефектных соединений при значениях температуры нагрева ниже температуры ликвидус в системе Ti-Al. По данным сканирующей электронной микроскопии и EDS-анализа установлено отсутствие в зоне соединений участков литого металла и остатков нанослоистых фольг, что свидетельствует о твердофазном характере формирования соединений и полном вытеснении нанослоистых фольг за пределы сечения заготовок. Библиогр. 12, рис. 8.

Ключевые слова: алюминид титана, сплав ВТ5, контактная стыковая сварка сопротивлением, нанослоистая фольга, твердофазное соединение

RESISTANCE BUTT WELDING OF TITANIUM ALUMINIDE γ -TiAl WITH VT5 ALLOY

S.I.KUCHUK-YATSENKO, I.V. ZYAKHOR, A.O. NAKONECHNY, M.S. ZAVERTANNY, L.M. KAPITANCHUK

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11, Kazimir Malevich str., 03150, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

In the work, the peculiarities of formation of dissimilar joints of Ti-46Al-2Cr-2Nb alloy on the base of titanium aluminide γ -TiAl with titanium alloy VT5 in resistance butt welding, in particular, using interlayers in the form of nanolayer foils were studied. In resistance butt welding without the use of nanolayer foils it was failed to provide the defect-free joints: in the butts the presence of areas of cast metal and cracks was detected. It was found that the use of Ti/Cu and Cu-Ti/Ni-C systems as an interlayer of nanolayer foils of an eutectic type significantly influences the activation processes of the surfaces to be welded and the formation of joints in resistance butt welding. The presence of nanolayer foils in the contact zone facilitates the formation of a thin layer of the liquid phase at the initial stage of heating process, localization of heat evolution process, activation of surfaces of both alloys with the duration of heating stage of 50...60% of such at the direct resistance welding of alloys γ -TiAl and VT5. The two-stage pressure cyclogram in RBW provides crystallization of eutectics in the process of deformation of billets and the formation of defect-free joints at the values of heating temperature, which are lower than the liquidus temperature in the system Ti-Al. According to the data of scanning electron microscopy and the ESD-analysis, the absence of the areas of cast metal and the remnants of nanosheet foils in the zone of joints was established, which testifies the solid-phase nature of the formation of joints and the complete displacement of nanolayer foils beyond the cross-section of the billets. 12 Ref., 8 Fig.

Keywords: titanium aluminide, VT5 alloy, resistance butt welding, nanolayer foil, solid-phase joint

Надійшла до редакції 17.07.2018