

Юрій Фальченко, Лідія Петрушинець, Олег Новомлинець

ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ ІНТЕРМЕТАЛІДУ TiAl З КОНСТРУКЦІЙНИМИ СПЛАВАМИ ЧЕРЕЗ НАНОШАРУВАТІ ФОЛЬГИ

Актуальність теми дослідження. З розвитком аерокосмічних технологій і появою нових жароміцних сплавів виникає необхідність в їх зварюванні в однорідному та різнорідному поєднанні. До таких пар можна віднести з'єднання інтерметалідних сплавів TiAl з конструкційними сплавами на основі титану чи нікелю.

Постановка проблеми. Дифузійне зварювання є перспективним методом з'єднання сплавів на основі TiAl з жароміцними сплавами. Утворення з'єднання може супроводжуватися формуванням крихких фаз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для утворення бездефектних з'єднань необхідно застосовувати проміжні прошарки.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Для зменшення хімічної неоднорідності у стику перспективно є застосування наношаруватих фольг.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження особливостей формування з'єднань алюмініду титану зі сплавами на нікелевій і титановій основі при застосуванні наношаруватих фольг.

Виклад основного матеріалу. Досліджено вплив наношаруватих фольг на структуру й мікротвердість зварних з'єднань, які формуються у процесі дифузійного зварювання.

Висновки відповідно до статті. При дифузійному зварюванні сплавів TiAl з VT8 зона з'єднання характеризується значним концентраційним градієнтом у розподілі Ti і Al між TiAl і VT8. При застосуванні наношаруватих фольг Al/Ti хімічний склад у зоні з'єднання вирівнюється та утворюються загальні зерна на колишній границі контакту.

При дифузійному зварюванні сплавів TiAl з EI437B без прошарків у зоні з'єднання з боку нікелевого сплаву спостерігається істотне підвищення мікротвердості до 14,01 ГПа, що може бути результатом формування крихких інтерметалідних фаз на основі системи Ni-Al-Ti. Застосування наношаруватої фольги Ni-Al/Ni-Ni забезпечує утворення бездефектних з'єднань, сприяє формуванню дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів і зниженнями значеннями мікротвердості.

Ключові слова: дифузійне зварювання у вакуумі; мікроструктура; TiAl; VT8; EI437B; наношаруваті фольги.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Алюмініди титану є перспективними матеріалами для виготовлення деталей авіаційних двигунів, стільникових конструкцій та обшивки надзвукових літальних апаратів, деталей сопла, лопаток компресора, елементів конструкції камери згоряння, поршнів автомобільних двигунів тощо [1; 2].

Із розвитком аерокосмічних технологій і появою нових конструкційних жароміцних сплавів виникає необхідність в їх зварюванні як в однорідному, так і в різнорідному поєднанні. До таких пар можна віднести з'єднання інтерметалідних сплавів TiAl з конструкційними сплавами на основі титану чи нікелю.

Постановка проблеми. Наявні технології зварювання плавленням даних матеріалів не дозволяють отримати високоякісні зварні з'єднання через структурні перетворення у зоні термічного впливу, які призводять до збільшення концентрації напружень і, як наслідок, до розтріскування матеріалу [3; 4]. Дифузійне зварювання (ДЗ) є найбільш перспективним методом з'єднання сплавів на основі TiAl з жароміцними сплавами як на основі титану [5–10], так і нікелю [11–14]. Однак при цьому методі зварювання утворення з'єднання супроводжується формуванням дифузійної зони зі складним фазовим складом, що включає крихкі сполуки, які можуть негативно вплинути на механічні властивості. Додаткові труднощі створюють специфічні як для сплавів TiAl, так і для Ni жароміцних сплавів властивості, а саме їх підвищена міцність при температурах зварювання і низька пластичність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При з'єднанні γ -TiAl зі сплавом титану для активації контактних поверхонь більш твердого інтерметалідного сплаву зазвичай застосовуються високі значення зварювальних тисків (аж до 200 МПа) поряд з витримкою протягом 1–2 годин [5–7], що значною мірою перевищує термо-деформаційні параметри зварювання, рекомендовані для сплавів титану. При ДЗ різнорідних матеріалів для активації поверхонь металів, що зварюються, та інтенсифікації дифузійних процесів здебільшого застосовують проміжні прошарки [15]. Однак, застосування проміжних

прошарків на основі монолітних матеріалів, отриманих прокаткою, що мають товщину ~ 50–300 мкм, не зовсім доцільно, оскільки створюються дифузійні зони з хімічним складом і механічними властивостями, які різко відрізняються від властивостей матеріалів, що зварюються [16]. При використанні цього підходу інтенсифікації дифузійних процесів у зоні з'єднання може сприяти попереднє наводнення проміжних прошарків. Для запобігання виділенню водню на стадії нагрівання, зварювання необхідно проводити із застосуванням високоінтенсивних джерел нагрівання, які б забезпечили швидкість зростання температури ~ 1200 °C/хв [11].

Для активізації процесу утворення з'єднання перспективним є застосування покриттів або фольги з дрібнозернистою структурою, які дозволяють локалізувати пластичну деформацію безпосередньо у стику. Наприклад, у роботі [12] для цього перед зварюванням TiAl з нікелевим сплавом проводили лазерну модифікацію, яка полягала в оплавленні поверхневого шару алюмініду титану, а також нанесенні на поверхню сплаву Ni покриття Ti-46,5Al. Металографічний аналіз з'єднань дефектів не виявив, однак наявність крихких фаз у зоні сплавлення нікелевого сплаву з покриттям не дозволила отримати високоміцні з'єднання. Застосування фольги зі сплаву Ti в аморфному стані при з'єднанні TiAl з Ti-6Al-4V розглянуто авторами [9]. Були отримані з'єднання з міцністю на рівні 88 % від значень основного матеріалу, проте інтенсивний потік титану в TiAl, який не скомпенсований дифузією алюмінію в зворотному напрямку, призводить до утворення значної пористості.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Використання при зварюванні прошарків на основі монолітних матеріалів хоча і сприяє формуванню зварного з'єднання, але створює в зоні з'єднання ділянки із суттєвою хімічною неоднорідністю.

Для зменшення хімічної неоднорідності у стику перспективним є застосування тонкої наночастинкової фольги, отриманої методом електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі [17]. Використання градієнтних прошарків неоднорідних за хімічним складом, дозволяє змінювати умови отримання зварного з'єднання та більш ефективно впливати на дифузію елементів і формування зони з'єднання, а саме її товщину і склад.

Мета статті. Метою цієї роботи є дослідження особливостей формування з'єднань інтерметалідного сплаву TiAl зі сплавами на нікелевій і титановій основі при застосуванні наночастинкової фольги товщиною 20...30 мкм, отриманої методом електронно-променевого випаровування і осадження у вакуумі з парової фази.

Виклад основного матеріалу. Дифузійне зварювання у вакуумі зразків проводили в установці У-394М. Як нагрівач використовували електронно-променеву гармату кільцевої форми. Температуру зварювання контролювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари. Вакуум в робочій камері підтримували на рівні $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Підготовка зразків до зварювання полягала в розрізанні матеріалу на електроерозійному верстаті, шліфуванні контактних поверхонь і знежиренні.

Об'єктом досліджень були сплави: TiAl, VT8 і EI437Б, хімічний склад яких наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплавів

Сплав	Елемент %, ваг.							
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
TiAl	28,57–30,91	–	61,27–62,64	2,16–3,35	–	–	3,56–7,87	–
EI437Б	0,60–0,85	0,70–0,58	2,57–2,53	21,10–20,57	0,72–0,77	74,31–74,71	–	–
VT8	5,95–7,76	0,1	87,69–89,73	–	–	–	–	4,27–4,71

Сплав алюмініду титану був отриманий методом електронно-променевого переплаву з наступним ізостатичним пресуванням і прокатуванням, після чого виконували го-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

могенізуюче відпалювання. Структура TiAl ламельна та являє собою пластини γ -фази, по межах яких розташовані тонкі прошарки α_2 -фази.

Для сплаву BT8 характерна змішана структура, яка складається з твердих розчинів на основі α - і β -модифікацій титану. Легуючі елементи сплаву BT8 підвищують міцність титану і знижують його пластичність [18].

Сплав EI437B належить до групи матеріалів з особливо низькими технологічними властивостями за оброблюваністю, які визначаються високою жароміцністю, низькою теплопровідністю, високою схильністю до механічного зміцнення (наклепу) в процесі механічної обробки [19]. Сплав є важкозварюваним дисперснозміцненим суперсплавом, що містить значну кількість хрому й титану, схильний до утворення тріщин у зоні термічного впливу [20].

Як проміжні прошарки застосовували наночаруваті фольги на основі систем Al-Ti (Ti-38Al, % ваг.) і Al-Ni (Ni-31,6Al, % ваг.) товщиною 20...30 мкм. Для зменшення дифузійної рухливості хрому і заліза з боку нікелевого сплаву в напрямку до TiAl прошарки системи Al-Ni мали покриття з нікелю товщиною 2,5 мкм. Наночаруваті фольги отримували методом електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі.

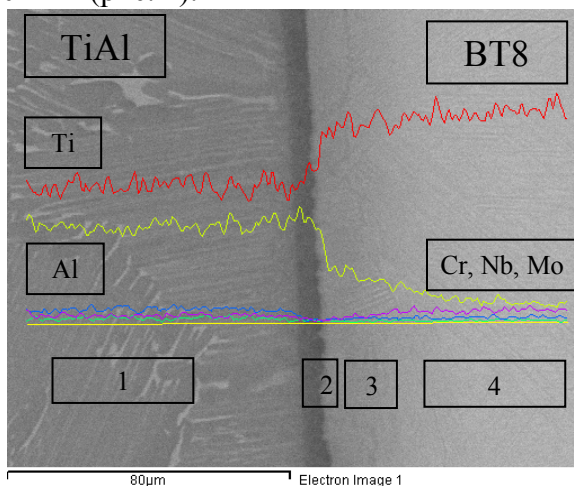
Аналіз мікроструктури зварних з'єднань проводили за допомогою електронного мікроскопа CAMSCAN 4, який оснащений системою енергодисперсійного аналізу EDX INCA 200 для визначення хімічного складу. Для цього за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального устаткування фірми Struers були виготовлені шліфи поперечного перерізу зварних з'єднань.

Оцінку мікротвердості зварних з'єднань проводили на установці «Мікрон-гамма» методом автоматичного індентування з використанням алмазної пірамідки Берковича ($\alpha = 65^\circ$) при навантаженні 0,4 Н [21].

Зварювання інтерметалідного сплаву TiAl з титановим сплавом BT8.

Зварювання проводили при температурі $T_{зв} = 1200$ °С, тиску $P_{зв} = 20$ МПа, тривалості $t_{зв} = 20$ хв. Як проміжний прошарок використовували наночаруваті фольги Al/Ti.

При зварюванні без прошарку було отримано бездефектне з'єднання з дифузійною зоною завтовшки 7...10 мкм (рис. 1).

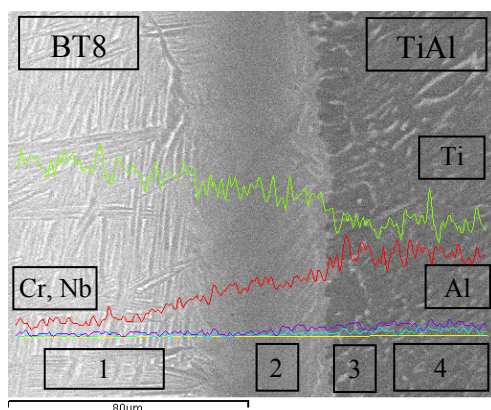


Номер вимірювання	Елемент %, ваг.				
	Al	Ti	Cr	Nb	Mo
Spectrum 1	28,57	61,27	2,16	7,87	0,13
Spectrum 2	31,88	65,90	0,85	0,98	0,39
Spectrum 3	15,00	82,93	0,17	–	1,90
Spectrum 4	6,00	89,73	–	–	4,27

Рис. 1. Мікроструктура й локальний хімічний аналіз зони з'єднання TiAl–BT8

Мікротвердість зони з'єднання знаходиться на рівні інтерметалідного сплаву і становить 4,2 ГПа. Характер розподілу елементів поблизу границі розділу вказує на дифузію атомів Al з TiAl в сплав титану й атомів Ti у протилежному напрямку. Як показує характер розподілу елементів, зона з'єднання характеризується значним концентраційним градієнтом у розподілі Ti і Al між TiAl і BT8.

Для усунення хімічної неоднорідності при зварюванні TiAl зі сплавом титану BT8 застосовували нанощаруваті прошарки системи Al-Ti. Як показали металографічні дослідження, у процесі зварювання формується дифузійна зона завтовшки 45...50 мкм, у стику дефекти відсутні (рис. 2). На колишній границі контакту фольги з TiAl спостерігається утворення дрібних рекристалізованих зерен. З боку сплаву BT8 в напрямку прошарку відбувається проростання зерен з утворенням характерних для сплаву BT8 структур кошикового плетіння, що складаються з α і β фаз. Розподіл Ti і Al має плавний характер без різких перегинів концентрації. З боку сплаву TiAl у прошарок відбувається дифузія хрому і ніобію, де їх вміст досягає відповідно 0,80 і 1,58 % ваг.



Номер вимірювання	Елемент %, мас.				
	Al	Ti	Cr	Nb	Mo
Spectrum 1	5,95	89,34	–	–	4,71
Spectrum 2	20,81	76,82	0,80	1,58	–
Spectrum 3	29,90	60,87	2,38	6,84	–
Spectrum 4	29,35	61,50	2,74	6,40	–

Рис. 2. Мікроструктура й локальний хімічний аналіз зони з'єднання TiAl–Al/Ti–BT8

Такий розподіл елементів свідчить про те, що в зоні з'єднання відсутні небезпечні ділянки з високим рівнем залишкових напружень, які з'являються при охолодженні зварних з'єднань. У приконтатній зоні прошарок/алюмінід титану (~7 мкм від прошарку) спостерігається формування дрібних рекристалізованих зерен. Мікротвердість зони з'єднання близька до значень сплаву TiAl і становить 3,8 ГПа.

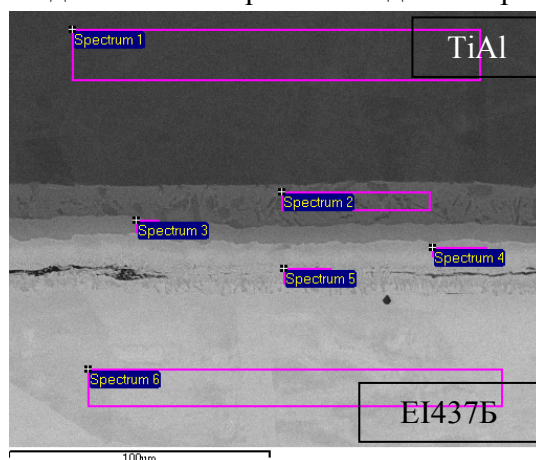
З аналізу кривих розподілу елементів у з'єднаннях отриманих без застосування проміжних прошарків і з застосуванням нанощаруватих фольг (рис. 1, 2) видно, що у випадку зварювання інтерметалідного сплаву TiAl безпосередньо зі сплавом BT8 по лінії з'єднання спостерігається різкий перепад у вмісті алюмінію й титану, що може негативно вплинути на працездатність зварних з'єднань. Застосування нанощаруватого прошарку системи Al-Ti забезпечує плавний характер зміни концентрації алюмінію і титану в зоні з'єднання.

Зварювання інтерметалідного сплаву TiAl з жароміцним нікелевим сплавом.

Зварювання інтерметалідного сплаву TiAl зі сплавом EI437Б проводили при температурі $T_{зв} = 1050$ °С, тиску $P_{зв} = 20$ МПа, тривалості $t_{зв} = 20$ хв. Як проміжний прошарок використовували нанощаруваті фольги Ni-Al/Ni-Ni.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

При дифузійному зварюванні алюмініду титану з жароміцним сплавом EI437Б без проміжних прошарків утворюється зона з'єднання товщиною ~ 35 мкм, в якій можна виділити 4 шари. У зоні з'єднання спостерігаються ділянки розтріскування (рис. 3).



Номер вимірювання	Елемент %, мас.						
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Spectrum 1	30,91	–	62,19	3,19	–	–	3,71
Spectrum 2	23,11	–	65,11	4,27	–	3,81	3,69
Spectrum 3	24,57	–	39,97	4,54	0,55	27,23	3,13
Spectrum 4	12,10	–	18,06	4,87	–	64,97	–
Spectrum 5	9,17	–	9,37	22,85	–	58,61	–
Spectrum 6	0,68	0,39	2,63	20,61	0,75	74,95	–

Рис. 3. Мікроструктура й локальний хімічний аналіз зони з'єднання TiAl–EI437Б

На основі результатів мікрорентген-спектрального аналізу отриманих з'єднань можна зробити висновок, що за хімічним складом, перший шар складається переважно з Ti_3Al , а другий – із суміші TiAl з твердим розчином хрому в нікелі. Третій шар відповідно до [22] переважно складається з Ni_2AlTi , четвертий – із твердого розчину хрому в нікелі з домішками алюмінію й титану (рис. 3).

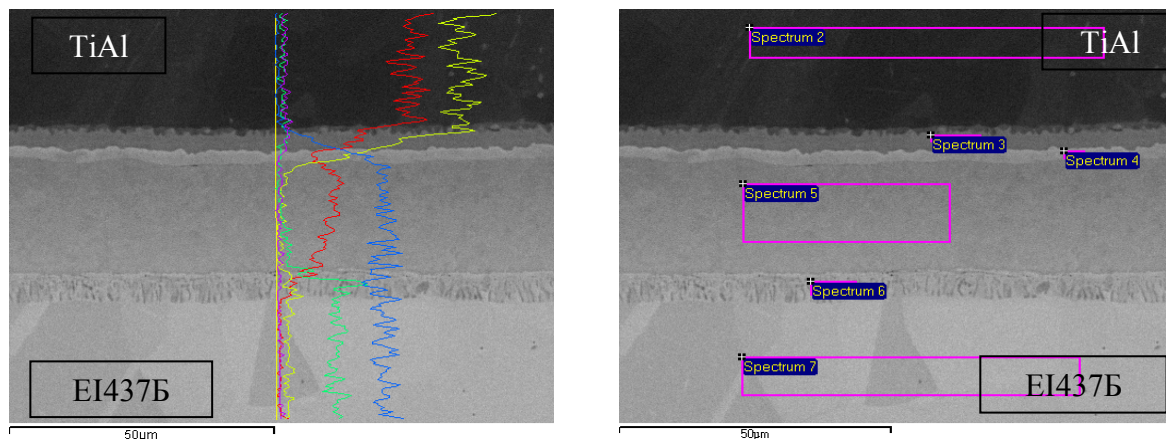
При цьому в зоні з'єднання з боку нікелевого сплаву спостерігається істотне підвищення мікротвердості з 4,10 ГПа (основний метал) до 14,01 ГПа, що може бути результатом формування крихких інтерметалідних фаз на основі системи Ni-Al-Ti і підвищенням вмісту хрому в приповерхневих шарах уздовж стику.

Надалі при зварюванні застосовували нанощаруваті фольги Ni-Al/Ni-Ni. Відповідно до даних роботи [14] нікель має хорошу розчинність у титані, а його застосування як елемента фольги має сприяти, з одного боку, зниженню схильності фольги до окислення, а з іншого – шар нікелю виступає в ролі бар'єра для дифузії хрому, титану і заліза з нікелевого сплаву в напрямку до інтерметалідного сплаву.

Були отримані бездефектні з'єднання, пори і тріщини у стику відсутні (рис. 4). Використання при зварюванні нанощаруватої фольги забезпечує формування з'єднання і сприяє активному протіканню дифузійних процесів між інтерметалідним сплавом і жароміцним сплавом на нікелевій основі. Так, взаємна дифузія компонентів сплаву і фольги призводить до формування у стику дифузійної зони шириною ~ 45 мкм, в якій можна виділити 4 шари.

У стику сформувалися багатофазні шари з різним співвідношенням фазових складових, що утворюються за рахунок реакційної дифузії компонентів. Аналіз хімічного складу зони з'єднання дозволяє зробити висновок, що з боку алюмініду титану формуються шари Ti_3Al і TiAl. Велика центральна зона являє собою суміш Ni_3Al з твердим

розчином хрому в нікелі. Біля сплаву EI437Б формується прошарок твердого розчину хрому в нікелі з домішками алюмінію й титану. Наявність шарів нікелю з обох сторін фольги системи Al-Ni сприяє зниженню небажаної дифузії легуючих елементів зі сплавів, що зварюються, попереджаючи утворення інтерметалідних фаз із високою мікротвердістю, що дозволило знизити мікротвердість більше ніж удвічі (6,81 ГПа) в порівнянні зі з'єднаннями, отриманими без проміжних прошарків.



Номер вимірювання	Елемент %, мас.					
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Spectrum2	30,46	62,64	3,35	–	–	3,56
Spectrum3	24,94	40,39	3,52	–	28,05	3,11
Spectrum4	13,77	24,07	0,40	–	60,67	1,10
Spectrum5	21,78	0,75	1,06	–	76,41	–
Spectrum 6	6,20	3,01	24,56	–	66,23	–
Spectrum 7	0,76	2,59	20,83	0,74	75,07	–

Рис. 4. Мікроструктура й локальний хімічний аналіз зони з'єднання TiAl–Ni–Al/Ni–Ni–EI437Б

На рис. 5 наведені значення мікротвердості в зоні з'єднання при зварюванні через проміжні прошарки і без них. При зварюванні TiAl з жароміцним сплавом на основі нікелю без проміжних прошарків у стик формуються інтерметалідне з'єднання з максимальними значеннями мікротвердості на рівні 14,01 ГПа. Застосування при дифузійному зварюванні наношаруватої фольги Ni-Ni/Al-Ni дозволяє знизити мікротвердість більше ніж удвічі (до 6,49...6,81 ГПа).

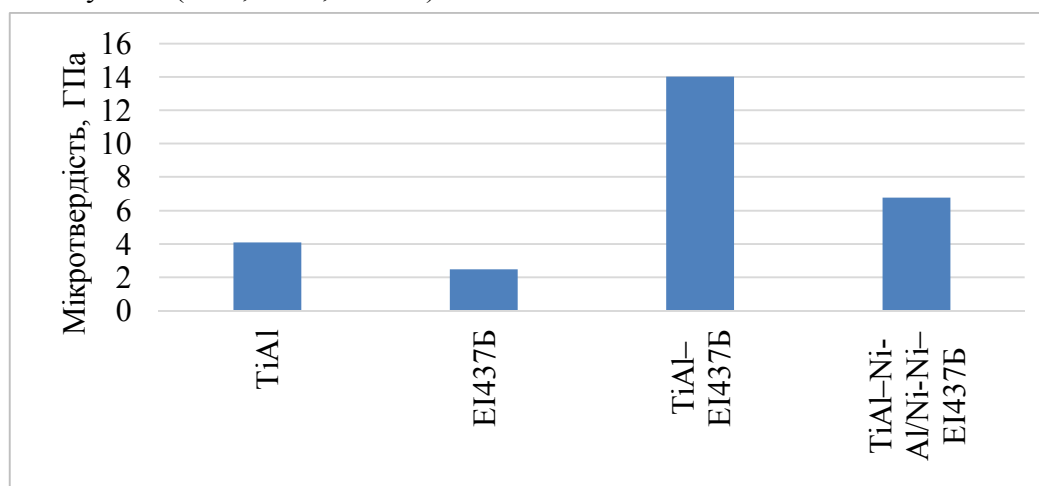


Рис. 5. Значення мікротвердості основного металу і зони з'єднання

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Висновки відповідно до статті. При дифузійному зварюванні у вакуумі інтерметалідного сплаву TiAl зі сплавом титану ВТ8 зона з'єднання характеризується значним концентраційним градієнтом у розподілі Ti і Al між TiAl і ВТ8.

Застосування нанощаруватих прошарків системи Al-Ti при зварюванні у вакуумі TiAl з ВТ8 сприяє вирівнюванню хімічного складу в зоні з'єднання й утворенню загальних зерен на колишній границі контакту.

При дифузійному зварюванні TiAl з жароміцним сплавом EI437B без проміжних прошарків у зоні з'єднання з боку нікелевого сплаву спостерігається істотне підвищення мікротвердості з 4,10 ГПа до 14,01 ГПа, що може бути результатом формування крихких інтерметалідних фаз на основі системи Ni-Al-Ti і підвищення вмісту хрому у приповерхневих шарах уздовж стику.

Застосування при дифузійному зварюванні TiAl з EI437B нанощаруватої фольги Ni-Al/Ni-Ni забезпечує утворення бездефектних з'єднань, сприяє формуванню в стику дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів і зниженими значеннями мікротвердості.

Список використаних джерел

1. Банных О. А., Поварова К. Б., Браславская Г. С., Масленков С. Б., Богатова М. Н. Механические свойства литых сплавов γ -TiAl. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1996. № 1. С. 11–14.
2. Польшкин И. С., Колачев Б. А., Ильин А. А. Алюминиды титана и сплавы на их основе. *Технология легких сплавов*. 1997. № 3. С. 32–39.
3. Patterson R. A., Martin P. L., Damkroger B. K., Christodoulou L. Titanium aluminide: electron beam weldability. *Welding research supplement*. 1990. № 1. P. 39-s–44-s.
4. Замков В. Н., Великоиваненко Е. А., Сабокаръ В. К., Вржижевский Э. Л. Выбор температуры предварительного подогрева γ -алюминид титана при ЭЛС. *Автоматическая сварка*. 2001. № 11. С. 20–23.
5. Wang Xiu-feng, Ma Mo, Liu Xue-bin, Wu Xue-qing, Tan Chao-gui, Shi Rong-kai, Lin Jiang-guo. Diffusion bonding of γ -TiAl alloy to Ti-6Al-4V alloy under hot pressure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2006. Vol. 16. P. 1059–1063.
6. Holmquist M., Recina V., Pettersson B. Tensile and creep properties of diffusion bonded titanium alloy IMI 834 to gamma titanium aluminide IHI Alloy 01A. *Acta Materialia*. 1999. Vol. 47, Is. 6. P. 1791–1799.
7. Wang X. F., Luo Z. C., Liu X. B., Lin J. G. Probing into diffusion bonding of laser surface treated γ -TiAl alloy/Ti-6Al-4V alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2008. Vol. 13, Is. 5. P. 452–455.
8. Wang X. R., Yang Y. Q., Luo X., Zhang W., Zhao G. M., Huang B. An investigation of Ti-43Al-9V/Ti-6Al-4V interface by diffusion bonding. *Intermetallics*. 2013. Vol. 36. P. 127–132.
9. Xue Z., Yang Q., Gu L., Hao X., Ren Y., Geng Y. Diffusion bonding of TiAl based alloy to Ti-6Al-4V alloy using amorphous interlayer. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2015. Vol. 46, Is. 1. P. 40–46.
10. Simoes S., Viana F., Ramos A.S., Vieira M. T., Vieira M. F. Diffusion Bonding of TiAl to Ti6Al4V Using Nanolayers. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. Vol. 27, Is. 10. P. 5064–5068.
11. Peng He, Jun Wanga, Tiesong Lin, Haixin Li. Effect of hydrogen on diffusion bonding of TiAl based intermetallics and Ni-based superalloy using hydrogenated Ti6Al4V interlayer. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. P. 1882–1887.
12. Li Z. F., Wu G. Q., Huang Z., Ruan Z. J. Diffusion bonding of laser surface modified TiAl alloy/Ni alloy. *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. P. 3470–3473.
13. Ramos A. S., Vieira M. T., Simoes S., Viana F., Vieira M. F. Joining of Superalloys to Intermetallics Using Nanolayers. *Advanced Materials Research*. 2009. Vol. 59. P. 225–229.
14. Ramos A. S., Vieira M. T., Simoes S., Viana F., Vieira M. F. Reaction-Assisted Diffusion Bonding of Advanced Materials. *Defect and Diffusion Forum*. 2010. Vols. 297–301. P. 972–977.

15. Люшинский А. В. Критерии выбора промежуточных слоев при диффузионной сварке в вакууме разнородных материалов. *Сварочное производство*. 2001. № 5. С. 40–43.
16. Юштин А. Н., Замков В. Н., Сабокарь В. К., Чвертко П. Н., Петриченко И. К. Сварка давлением интерметаллидного сплава γ -TiAl. *Автоматическая сварка*. 2001. № 1. С. 33–37.
17. Ustinov A. I., Falchenko Yu. V., Ishchenko A. Ya., Kharchenko G. K., Melnichenko T. V., Muraveynik A. N. Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*. Vol. 16, Is. 8. 2008. P. 1043–1045.
18. Чечулин Б. Б., Разуваева И. Н., Гольдфайн В. Н. Титановые сплавы в машиностроении. Ленинград: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977. 248 с.
19. Аникеев А. И., Верещака А. А., Верещака А. С., Бубликов Ю. И. Ультрадисперсные твердые сплавы как инструментальный материал для фрезерования труднообрабатываемых материалов. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион*. 2015. № 3. С. 152–162.
20. Гуляев А. П. Металловедение: учебник для вузов. 6-е изд. перераб. и доп. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.
21. Фирстов С. А., Горбань В. Ф., Печковский Э. П., Мамека Н. А. Уравнение индентирования. *Доповіді Національної академії наук України*. 2007. № 12. С. 100–106.
22. Qi Xiansheng, XueXiangyi, Tang Bin, Kou Hongchao, Hu Rui, Li Jinshan. Phase Evolution of Diffusion Bonding Interface between High Nb Containing TiAl Alloy and Ni-Cr-W Superalloy. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2015. Vol. 44, Is. 7. P. 1575–1580.

References

1. Bannykh, O. A., Povarova, K. B., Braslavskaja, H. S., Maslenkov, S. B., Bohatova, M. N. (1996). Mekhanicheskie svoystva litykh splavov γ -TiAl [Mechanical properties of cast alloys γ -TiAl]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov – Metallurgy and heat treatment of metals*, 1, 11–14 [in Russian].
2. Polkin, I. S., Kolachev, B. A., Ilin, A. A. (1997). Aluminidy titana i splavy na ikh osnove [Aluminides of titanium and alloys based on them]. *Tekhnologija legkikh splavov – Technology of light alloys*, 3, 32–39 [in Russian].
3. Patterson R. A., Martin P. L., Damkroger B. K., Christodoulou L. (1990). Titanium aluminide: electron beam weldability. *Welding research supplement*, 1, 39-s–44-s.
4. Zamkov, V. N., Velikoivanenko, E. A., Sabokar, V. K., Vrzhyzhevskiy, E. L. (2001). Vychor temperatury predvaritelnogo podogreva -aluminida titana pri ELS [Choice of temperature for preheating γ -titanium aluminide in EBW]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic welding*, 11, 20–23 [in Russian].
5. Wang Xiu-feng, Ma Mo, Liu Xue-bin, Wu Xue-qing, Tan Chao-gui, Shi Rong-kai, Lin Jiang-guo (2006). Diffusion bonding of γ -TiAl alloy to Ti-6Al-4V alloy under hot pressure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 1059–1063.
6. Holmquist, M., Recina, V., Pettersson, B. (1999). Tensile and creep properties of diffusion bonded titanium alloy IMI 834 to gamma titanium aluminide IHI Alloy 01A. *Acta Materialia*, 47 (6), 1791–1799.
7. Wang, X. F., Luo, Z. C., Liu, X. B., Lin, J. G. (2008). Probing into diffusion bonding of laser surface treated γ -TiAl alloy/Ti-6Al-4V alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 13 (5), 452–455.
8. Wang, X. R., Yang, Y. Q., Luo, X., Zhang, W., Zhao, G. M., Huang, B. (2013). An investigation of Ti-43Al-9V/Ti-6Al-4V interface by diffusion bonding. *Intermetallics*, 36, 127–132.
9. Xue, Z., Yang, Q., Gu, L., Hao, X., Ren, Y., Geng, Y. (2015). Diffusion bonding of TiAl based alloy to Ti-6Al-4V alloy using amorphous interlayer. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 46 (1), 40–46.
10. Simoes, S., Viana, F., Ramos, A. S., Vieira, M. T., Vieira, M. F. (2018). Diffusion Bonding of TiAl to Ti6Al4V Using Nanolayers. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27 (10), 5064–5068.
11. Peng, He, Jun, Wanga, Tiesong, Lin, Haixin, Li (2014). Effect of hydrogen on diffusion bonding of TiAl based intermetallics and Ni-based superalloy using hydrogenated Ti6Al4V interlayer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 1882–1887.
12. Li, Z. F., Wu, G. Q., Huang, Z., Ruan, Z. J. (2004). Diffusion bonding of laser surface modified TiAl alloy/Ni alloy. *Materials Letters*, 58, 3470–3473.
13. Ramos, A. S., Vieira, M. T., Simoes, S., Viana, F., Vieira, M. F. (2009). Joining of Superalloys to Intermetallics Using Nanolayers. *Advanced Materials Research*, 59, 225–229.
14. Ramos, A. S., Vieira, M. T., Simoes, S., Viana, F., Vieira, M. F. (2010). Reaction-Assisted Diffusion Bonding of Advanced Materials. *Defect and Diffusion Forum*, 297–301, 972–977.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

15. Liushynskiy, A. V. (2001). Kriterii vybora promezhutochnykh sloev pri diffuzionnoi svarke v vakuume raznorodnykh materialov [Criteria for choosing intermediate layers in diffusion welding in vacuum of dissimilar materials]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 5, 40–43 [in Russian].
16. Yushtyn, A. N., Zamkov, V. N., Sabokar, V. K., Chvertko, P. N., Petrychenko, I. K. (2001). Svarka davleniem intermetallidogo splava γ -TiAl [Pressure welding of the intermetallic alloy γ -TiAl]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 1, 33–37 [in Russian].
17. Ustinov, A. I., Falchenko, Yu. V., Ishchenko, A. Ya., Kharchenko, G. K., Melnichenko, T. V., Muraveynik, A. N. (2008). Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, 16 (8), 1043–1045.
18. Chechulin, B. B., Razuvaieva, I. N., Goldfein, V. N. (1977). *Titanovye splavy v mashinostroenii [Titanium alloys in mechanical engineering]*. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].
19. Anikeiev, A. I., Vereshchaka, A. C., Bublikov, Yu. I. (2015). Ultradispersnye tverdye splavy kak instrumentalnyi material dlia frezerovaniia trudnoobrabatyvaemykh materialov [Ultrafine carbides as a tool material for milling hard materials]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region – News of higher educational institutions. Volga region*, 3, 152–162 [in Russian].
20. Huljaiev, A. P. (1986). *Metallovedenie [Metal science]*. (6th ed., revised and sup.). Moscow: Metallurgy [in Russian].
21. Firstov, S. A., Horban, V. F., Pechkovskiy, E. P., Mameka, N. A. (2007). Uravnenie indentirovaniia [Indentation equation]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 100–106 [in Russian].
22. Qi Xiansheng, XueXiangyi, Tang Bin, Kou Hongchao, Hu Rui, Li Jinshan (2015). Phase Evolution of Diffusion Bonding Interface between High Nb Containing TiAl Alloy and Ni-Cr-W Superalloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 44 (7), 1575–1580.

UDC 621.791

Iurii Falchenko, Lidiia Petrushynets, Oleh Novomlynets

DIFFUSION WELDING OF TiAl INTERMETALLIC WITH STRUCTURAL ALLOYS THROUGH NANOLAYERED FOILS

Relevance of the research topic. With the development of aerospace technologies and the emergence of new heat-resistant alloys, there is a need for their welding in a homogeneous and heterogeneous combination. These pairs include the coupling of intermetallic TiAl alloys with titanium or nickel structural alloys.

Formulation of the problem. Diffusion welding is a promising method of joining TiAl-based alloys with heat-resistant alloys. The formation of a joint may be accompanied by the formation of fragile phases.

Analysis of recent research and publications. For formation of defect-free joints it is necessary to use intermediate layers.

Highlighting unexplored parts of a common problem. To reduce chemical heterogeneity in the joint it is necessary to use nanolayer foils.

Setting objectives. The aim of this work is to investigate the peculiarities of forming joints of titanium aluminide with nickel and titanium alloys when using nanolayered foils.

The main material. The effect of nanolayered foils on the structure and microhardness of welded joints formed during diffusion welding is investigated.

Conclusions of the article. In the diffusion welding of TiAl alloys with VT8, the joint zone is characterized by a significant concentration gradient in the distribution of Ti and Al between TiAl and VT8. When applying Al/Ti nanolayered foils, the chemical composition in the joint area is aligned and the total grains are formed at the former contact boundary.

During the diffusion welding of TiAl alloys with EI437B without layers in the joint zone from the side of the Nickel alloy there is a significant increase in microhardness up to 14.01 GPa, which can be the result of the formation of fragile intermetallic phases on the basis of Ni-Al-Ti. The application of Ni-Al/Ni-Ni nanolayered foil provides the formation of defect-free joints, contributes to the formation of a diffusion zone with a monotonous nature of the distribution of alloying elements and reduced values of microhardness.

Keywords: vacuum diffusion welding; microstructure; TiAl; VT8; EI437B; nanolayered foils.

Fig.: 5. Table: 1. References: 22.

Фальченко Юрій В'ячеславович – доктор технічних наук, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Falchenko Iurii – Doctor of Technical Sciences, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: falchenko@paton.kiev.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3028-2964>

Scopus Author ID: 7801687476

Петрушинець Лідія Вячеславівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Petrushynets Lidiia – PhD in Technical Sciences, Senior staff scientist, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: petrushynets@paton.kiev.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7946-3056>

Scopus Author ID: 55521777800

Новомлинець Олег Олександрович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Novomlynets Oleh – Doctor in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oon1@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

Scopus Author ID: 6507741249